

Ein Beitrag zum Einsatz von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas-Verbundelementen

Application of high-modulus adhesives
in load-bearing timber-glass-composite elements

An der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Felix Nicklisch

geboren am 09.04.1978 in Dresden

Erster Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller Technische Universität Dresden
Zweiter Gutachter	Prof. Erik Serrano Lund University
Tag der Verteidigung	15.03.2016

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Felix Nicklisch

Ein Beitrag zum Einsatz von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas-Verbundelementen

Dissertation. Dresden: Technische Universität, 2016

© 2016 Felix Nicklisch

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
D-01062 Dresden

Telefon +49 351 463 34845
Telefax +49 351 463 35039

www.bauko.bau.tu-dresden.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baukonstruktion an der Technischen Universität Dresden. Ein wesentlicher Teil beruht auf experimentellen Untersuchungen, die ich im Zuge des transnationalen Forschungsvorhabens „URBAN WOOD“ durchführen konnte. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung förderte dieses Projekt von 2011 bis 2014.

Mein herzlicher Dank gebührt an erster Stelle Professor Bernhard Weller, der mir die Promotion an seinem Institut ermöglicht und die Betreuung der Arbeit übernommen hat. Besonderes herausheben möchte ich dabei die Freiräume, die er mir bei der Gestaltung des Forschungsprojektes gewährt hat, sein Interesse am Thema und die Wertschätzung, die ich für meine Tätigkeit am Institut erfahren habe.

Weiterhin bedanke ich mich bei Professor Erik Serrano für die Übernahme des Zweitgutachtens. In der Endphase boten mir seine wertvollen Anregungen die Möglichkeit, den Inhalt der Arbeit weiter zu schärfen.

Ein großer Dank gilt ebenso der Gump & Maier GmbH aus Binswangen. Das Holzbauunternehmen – und hier in Person Sebastián Hernández-Maetschl – half tatkräftig bei der Herstellung der zahlreichen Bauteilprüfkörper. Der Wille, die neue Klebtechnologie auch in der Praxis zu testen, war ein wichtiger Ansporn für meine Forschung.

Bedanken möchte ich mich ebenso für den kollegialen Beistand am Institut. Ein besonderes Dankeschön schulde ich Silke Tasche, die große Teile der Arbeit Korrektur gelesen hat. Johannes Giese-Hinz danke ich für seine unermüdliche Unterstützung bei der Bildbearbeitung und den Versuchen.

Schließlich trugen meine Familie und meine Freunde durch ihre enorme Geduld und die gelegentlich notwendige Ablenkung zum Gelingen der Arbeit bei. Für diesen wertvollen Rückhalt danke ich meiner lieben Partnerin Susanne und meinen beiden wunderbaren Töchtern Frida und Luzie. Meiner Mutter und ihrem Mann Lutz danke ich, dass sie meinen Weg stets mit großer Zuversicht und Fürsorge begleiteten.

Kurzfassung

Bestärkt durch das gesellschaftliche und wirtschaftliche Interesse an nachhaltigen und ressourcenschonenden Formen des Bauens gewinnen Holzkonstruktionen wieder unverkennbar an Bedeutung. Mit dieser Entwicklung bilden sich neue Konstruktionsprinzipien und Materialkombinationen im Bauwesen heraus, zu deren ingenieurtechnischer Beurteilung zum Teil keine ausreichenden Erkenntnisse vorliegen.

Verbundkonstruktionen aus Holz und Glas sind eine innovative Bauweise, die zu einer höheren Materialeffizienz in Fassaden beiträgt, deren Wirkungsweise aber noch nicht ausreichend hinterfragt wurde. Werden Holz und Glas durch eine tragende Klebung verbunden, lässt sich das vielfach ungenutzte Tragpotenzial ausschöpfen, das eine in Scheibenebene belastete Verglasung aufweist. Die Qualität der Klebung entscheidet dabei über die Eigenschaften und das Leistungsvermögen des Bauteils.

Die üblicherweise an dieser Schnittstelle eingesetzten Silikonklebstoffe weisen eine hohe Nachgiebigkeit und eine vergleichsweise geringe Festigkeit auf. Wenn die Verbundelemente als Aussteifung mitwirken sollen, bleibt ihr Einsatz deswegen auf Gebäude mit höchstens zwei Geschossen limitiert. Die vorliegende Arbeit trägt entscheidend zur Erweiterung der baulichen Möglichkeiten bei, indem sie der Anwendbarkeit von hochfesten Klebstoffen, die für den Einsatz im Bauwesen nur wenig erforscht sind, auf vielschichtige Weise nachgeht.

Im Fokus stehen aussteifende Holz-Glas-Verbundelemente für die Fassade. Weder die Bauart noch das Bauprodukt Klebstoff sind derzeit in Deutschland in einer Norm erfasst. Das Klären der baurechtlichen Rahmenbedingungen ist daher unerlässlich und erfolgt mit engem Bezug zum konstruktiven Glasbau. Zusätzlich zur wissenschaftlichen Interpretation wird dadurch eine praxisnahe Bewertung der Versuchsergebnisse möglich, was ein Alleinstellungsmerkmal dieser Arbeit darstellt.

Das Verformungsvermögen des Klebstoffs spielt eine zentrale Rolle bei der Materialauswahl und Gestaltung der Holz-Glas-Verbundelemente. Der Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf das Tragverhalten eines Einzelements und auf dessen

Interaktion mit den anderen Bestandteilen des Tragwerks wird an einem Modellgebäude untersucht. Auf Basis dieser Parameterstudie lassen sich drei Steifigkeitsbereiche definieren, auf die sich die Klebstoffauswahl für die weiteren Untersuchungen stützt.

Der experimentelle Teil der Arbeit beginnt mit der ausführlichen Charakterisierung von sieben Klebstoffen. Davon werden zwei höherfeste Klebstoffe als geeignet identifiziert. Ein Silikonklebstoff wird als Referenzmaterial zur aktuellen Anwendungspraxis festgelegt. Das Hauptaugenmerk der folgenden Experimente richtet sich auf Aspekte der Alterungsbeständigkeit und des zeitabhängigen Materialverhaltens unter langandauernder mechanischer Beanspruchung.

In labormaßstäblichen Alterungsprüfungen werden die Klebstoffproben unterschiedlichen Schadeinwirkungen ausgesetzt, die im Glas- und Fassadenbau relevant sind. Darüber hinaus erfolgen Kriechversuche an kleinen und großen Scherprüfkörpern. Letztere stellen einen besonderen Mehrwert dar, da sie eine realistische Klebfugegeometrie aufweisen und die Ergebnisse dadurch dem tatsächlichen Bauteilverhalten nahekommen. Für diese Zeitstandversuche wurde eine bislang einzigartige Versuchsanlage aus sechs Prüfraumen mit Gasdruckfederbelastung entwickelt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass mit den gewählten höherfesten Klebstoffen die Festigkeit der nicht gealterten Klebschichten erwartungsgemäß gesteigert werden kann. Der Bruch des Fügepartners Holz wird zum maßgebenden Versagenskriterium. Die Verformungen des Verbundelements reduzieren sich gegenüber einer Silikonklebung deutlich. Allerdings offenbaren sich in einzelnen Alterungsszenarien und unter langandauernder Belastung auch Schwachstellen dieser Klebstoffe. Ihre Verwendung kann daher nur mit konstruktiven Kompensationsmaßnahmen oder durch Abschirmen der kritischen Einwirkungsgrößen empfohlen werden. Entsprechende Vorschläge werden bei der abschließenden Bewertung der Ergebnisse unterbreitet.

Verfahren und Beurteilungsmethoden, die in dieser Arbeit angewendet und entwickelt werden, erleichtern die zukünftige Bewertung weiterer aussichtsreicher Klebstoffe für den Holz-Glas-Verbund.

Abstract

Wooden constructions are on the rise again – encouraged by a strong public and economic trend towards sustainable and resource efficient buildings. Spurred by this growing interest novel design principles and material assemblies in architecture and the building industry evolve. These developments require further research due to the absence of evaluation tools and insufficient knowledge about their design.

Load-bearing timber-glass composite elements could contribute to a more efficient use of materials in façade constructions. In this case a linear adhesive bond connects the glass pane to the timber substructure. This enables an in-plane loading of the glass whose capacity is not used to its full potential in conventional façades as it is solely applied as an infill panel. The quality of the adhesive bond defines the characteristics and the performance of the whole structural component.

Structural sealants such as silicones, which are typically used for the joint, provide a high flexibility and only a low load-bearing capacity. Considering such elements being part of a bracing system, the mentioned characteristics limit the application range to buildings with not more than two stories. This thesis widens the scope with an in-depth examination of high-modulus adhesives, which have not yet been evaluated for their use in building constructions.

Timber-glass composite elements used as a bracing component in façades are the focus of this work. Neither the full structural component nor the adhesive have yet been included into German building standards. Hence it is essential to assess the general requirements of their application. The relevant aspects are clarified in the context of glass constructions. In addition to the scientific discussion of the results, this approach facilitates also a practical evaluation of the findings, which is a unique feature of this work.

The deformability of the adhesive becomes a crucial criterion when selecting the individual materials and designing the timber-glass composite elements. A case study assesses the influence of the adhesive stiffness on the behavior of a single element and its interaction with other members of the

structural system. Based on the results, three different stiffness classes are introduced to support the selection process of the adhesives to be examined in further investigations.

The experimental part of this work is initiated by a comprehensive characterization of seven shortlisted adhesives. The results enable a further differentiation of suitable materials. Two adhesives qualified as suitable for the main experiments. A silicone adhesive complements the test series to serve as a reference material to the current practice. In the next phase attention is drawn to the ageing stability and on the time-dependent material behavior of the adhesives under long-term loading.

Small-scale specimens made from adhesively joint timber and glass pieces are exposed to different ageing scenarios which relate to the impacts typically encountered in façades. Beyond that, creep tests are carried out on small and large shear specimen. The latter provide extra benefit as they comprise long linear adhesive joints resembling virtually the situation in a real-size element. A specific long-term test rig was developed for this purpose comprising a loading unit with gas pressurized springs.

Based on the results it can be concluded that joints with adhesives of high and intermediate stiffness enable an increase of characteristic failure loads and a significant reduction of deformation. With the stiffer joint near-surface rupture of timber fibers becomes the prevailing failure mechanism. The timber strength limits further loading of the adhesive joint. However, ageing and creep testing reveal also shortcomings of the adhesives. Their application can only be recommended if redundant compensation measures are taken or the joint is protected against critical environmental impacts. Appropriate solutions are proposed with the final recommendations of this work.

Methods and assessment tools that have been developed and tested for this work offer the possibility of a more straight-forward evaluation of further promising adhesives and their use in load-bearing timber-glass composites.

Inhalt

1	Einleitung	13
1.1	Motivation	13
1.2	Zielsetzung	18
1.3	Abgrenzung	20
1.4	Vorgehensweise	21
2	Die Holz-Glas-Verbundbauweise	25
2.1	Tragprinzip und Wirkungsweise	25
2.2	Forschungsschwerpunkte und Anwendungen	27
2.2.1	Geklebte Verglasungssysteme für Fenster	27
2.2.2	Träger	28
2.2.3	Wandscheiben und Schubfelder	32
2.2.4	Verbundplatten	36
2.3	Tragendes Glas im Verbund	37
2.3.1	Relevanz für Holz-Glas-Verbundlösungen	37
2.3.2	Historische Vorbilder	37
2.3.3	Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas	38
2.3.4	Verbundträger	40
2.3.5	Wandscheiben aus Glas	43
2.4	Konstruktionsprinzipien von tragenden Wand- und Fassadenelementen aus Holz und Glas	46
2.4.1	Aufbau	46
2.4.2	Verglasung	46
2.4.3	Ausbildung der Klebfuge	48
2.4.4	Marktreife Systeme mit Koppelleiste	49
2.4.5	Identifizieren geeigneter Tragsysteme	52
2.4.6	Skelett-, Tafel- und Massivholzbauweise	53
2.5	Zusammenfassung wesentlicher Erkenntnisse	55
3	Klebverbindungen im Glasbau	57
3.1	Fügen von Glas	57
3.1.1	Besondere Merkmale des Fügeworkstoffs	57
3.1.2	Wirkprinzip und Fügeverfahren	60
3.1.3	Vor- und Nachteile von Klebverbindungen	61
3.1.4	Glasoberfläche	65
3.2	Typische Anwendungsbeispiele im Glasbau	67
3.2.1	Klassifizierung	67
3.2.2	Einordnung der Holz-Glas-Verbundbauweise	69
3.2.3	Structural Sealant Glazing	71
3.2.4	Ganzglaskonstruktionen	74
3.3	Planungsstrategien	76
3.3.1	Sicheres Bauteilversagen	76
3.3.2	Redundanz und Versagensszenarien	78

3.3.3	Besonderheiten bei geklebten Verglasungen	80
3.4	Baurechtliche Rahmenbedingungen	82
3.4.1	Normung und Verfahrensweise in Deutschland	82
3.4.2	Harmonisierung auf europäischer Ebene	84
3.4.3	ETAG 002 – Leitlinie für Structural Glazing	86
3.4.4	Der Weg zur geklebten Glaskonstruktion	88
4	Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf aussteifende Holz-Glas-Verbundtragwerke	91
4.1	Aussteifung von Holzbauten	91
4.2	Berechnungsverfahren	92
4.2.1	Begründung der Auswahl der Verfahren	92
4.2.2	Verteilung von Horizontallasten auf die Wandscheiben eines Aussteifungssystems	93
4.2.3	Wandscheibe als Schubfeld	95
4.2.4	Federmodelle	97
4.3	Randbedingungen für die Analyse	101
4.3.1	Modellgebäude	101
4.3.2	Konstruktive Gestaltung	103
4.3.3	Lastannahmen	104
4.4	Parameterstudie	107
4.4.1	Nachgiebigkeit der Kernwände	107
4.4.2	Nachgiebigkeit eines Verbundelements	108
4.4.3	Auswirkung der Elementanordnung	112
4.4.4	Lastumlagerung bei Ausfall von Elementen	114
4.4.5	Horizontallastanteil auf Fassade und Kern	116
4.5	Rückschlüsse auf die Tragsystemgestaltung und die Klebstoffauswahl	120
5	Materialauswahl und -charakterisierung	123
5.1	Untersuchungsprogramm	123
5.2	Materialeigenschaften der Füge Teile	124
5.2.1	Glas	124
5.2.2	Holz und Holzwerkstoffe	126
5.3	Klebstoffe	128
5.3.1	Auswahlkriterien für Holz-Glas-Klebungen	128
5.3.2	Vorauswahl der Klebstoffsysteme	130
5.4	Experimentelle Methoden zur Charakterisierung der Klebstoffe	134
5.4.1	Dynamisch-mechanische Analyse	134
5.4.2	Einaxialer Zugversuch	135
5.4.3	Scherversuch	138
5.5	Versuchsergebnisse	141
5.5.1	Glasübergangstemperatur	141
5.5.2	Spannungs-Dehnungs-Beziehung	145

5.5.3	Einpunktkennwerte	150
5.5.4	Scherfestigkeit und Bruchbildanalyse	151
5.6	Klebstoffauswahl für die Hauptuntersuchungen	155

6 Experimentelle Untersuchungen an Klebverbindungen im Labormaßstab 157

6.1	Methodik	157
6.1.1	Untersuchungsgegenstand	157
6.1.2	Beurteilungsgrundlagen	158
6.1.3	Untersuchungsprogramm	159
6.1.4	Auswertungsmethoden	162
6.2	Geometrie und Herstellung der Prüfkörper	164
6.2.1	Prüfkörper zum Bestimmen der Haftfestigkeit vor und nach künstlicher Alterung	164
6.2.2	Scherprüfkörper für Kriechversuche	165
6.2.3	Vorbereiten und Konditionieren der Proben	166
6.3	Verfahren zur mechanischen Prüfung und zur künstlichen Alterung	168
6.3.1	Zug- und Scherversuche	168
6.3.2	Lagerung unter UV-Bestrahlung	170
6.3.3	Lagerung in Reinigungsmittellösung	171
6.3.4	Holzfeuchtewechsel bei +20 °C	172
6.3.5	Lagerung in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre	173
6.3.6	Kriechversuche	174
6.4	Auswertung der Versuchsergebnisse	176
6.4.1	Anfangsfestigkeit im Scherversuch	176
6.4.2	Anfangsfestigkeit im Zugversuch	181
6.4.3	Sichtbare Veränderungen der Klebschicht	183
6.4.4	Restfestigkeit nach Alterung	185
6.4.5	Analyse der Versagensmuster	189
6.4.6	Kriechverhalten	192
6.4.7	Restfestigkeit nach Vorbelastung	198

7 Experimentelle Untersuchungen an bauteilähnlichen Prüfkörpern 201

7.1	Untersuchungsprogramm und Methodik	201
7.1.1	Ziel der Untersuchungen	201
7.1.2	Materialien	202
7.1.3	Großer Scherprüfkörper	203
7.1.4	Herstellung der Prüfkörper	205
7.1.5	Versuchsprogramm – Bauteilversuche	207
7.2	Entwicklung eines Kriechprüfstands	210
7.2.1	Prüfrahmen	210
7.2.2	Lasteinleitung	211
7.2.3	Belastungsvorgang	212

7.2.4	Messtechnik und Monitoring	213
7.2.5	Modifikation für Kurzzeitversuche	214
7.3	Große Scherversuche unter Kurz- und Langzeit einwirkung	215
7.3.1	Tragfähigkeit bei kurzzeitiger Lasteinwirkung	215
7.3.2	Spannungsverteilung im Glas	219
7.3.3	Kriechversuche mit 1000 Stunden Laufzeit	221
7.3.4	Verlängerte Kriechversuche am Klebstoff mit mittlerer Steifigkeit	226
7.3.5	Tragfähigkeit nach Vorbelastung	230
8	Bewertung und Handlungsempfehlung	231
8.1	Alterungsverhalten	231
8.2	Korrelation der Ergebnisse aus Füge- und Bauteilversuchen	233
8.2.1	Versuche bei kurzzeitiger Lasteinwirkung	233
8.2.2	Versuche bei langandauernder Lasteinwirkung	235
8.3	Der Vorzugsklebstoff und seine Einsatzgrenzen	238
8.4	Konstruktion	241
9	Zusammenfassung und Ausblick	243
9.1	Zusammenfassung	243
9.2	Ausblick	249
10	Literatur	253
11	Abbildungsverzeichnis	263
12	Tabellenverzeichnis	267
13	Bezeichnungen	268

Anhang

A	Materialkennwerte zur Klebstoffauswahl	271
B	Klebverbindungen im Labormaßstab	287
C	Bauteilähnliche Prüfkörper	373

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Streben nach immer höherer Transparenz von Bauwerken ist ein wesentliches Merkmal der Architektur der letzten hundert Jahre. Mit dieser Entwicklung, die auch zukünftig unsere Bauten prägen wird, verbindet sich ein stetig wachsender Anteil von Glas in der Gebäudehülle. Heute bestimmen hochwertige gläserne Fassaden die gebaute Umwelt in vielen Teilen der Welt.

Ein Großteil der Verglasungen übernimmt dabei nur eine ausfachende Funktion. Senkrecht zur Scheibenebene wirkende Beanspruchungen werden über Plattenbiegung zu den Auflagern geleitet und dort in die Unterkonstruktion abgetragen. Die vorhandenen Tragreserven in der Scheibenebene bleiben bei solchen Verglasungen weitestgehend ungenutzt. Dieses Potenzial soll im Sinne materialeffizienter Gebäudehüllen erschlossen werden. Glasfassaden und Verglasungen in tragenden Wänden können dann zur Aussteifung der gesamten Tragstruktur oder eines Teilsystems beitragen. Wie schlank Konstruktionen ausgeführt werden können, in denen Glas auf diese Weise eingesetzt wird, zeigen bereits die kühnen Glas-Eisenkonstruktionen der Gewächshäuser und Palmenhäuser des 19. Jahrhunderts.¹

War damals die Industrialisierung der Motor für das Entstehen der neuartigen Bauweisen, so sind es heute der globale Klimawandel und die damit verbundenen ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Herausforderungen, die Innovationen in vielen Ingenieurdisziplinen vorantreiben. Das Bauwesen steht dabei im Fokus, denn es zählt zu den größten Ressourcenverbrauchern weltweit.² Die Nachhaltigkeit und Energieeffizienz von Bauwerken spielt eine immer

¹ In der Kuppelkonstruktion des Kibble Palace in Glasgow, der zu den bedeutendsten Glashäusern aus dieser Epoche zählt, wird Glas als versteifendes Element verwendet. Vergleiche Kohlmaier 1988, S. 351.

² Der Generalsekretär der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) Dr.-Ing. E. h. Fritz Brickwedde wird in einer Pressemitteilung der DBU vom 14. Januar 2013 (Nr. 4/2013, AZ 91410/08) mit folgenden Worten zitiert: „30 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen und 40 Prozent des Ressourcenverbrauchs fallen am Bau an. Es sollte deshalb ein hochwertiges Recycling [...] angestrebt werden.“

größere Rolle und beeinflusst Entscheidungen zu ästhetischen, konstruktiven und funktionalen Gesichtspunkten. Dieser Umstand lässt die Nachfrage nach ressourcenschonenden Konstruktionen stetig wachsen. Holz und Holzwerkstoffe spielen bei dieser Entwicklung eine zentrale Rolle. Die Akteure am Bau suchen daher nach neuen Konstruktionsprinzipien und Materialkombinationen, in denen sich der nachwachsende Rohstoff vorteilhaft einsetzen lässt. Hieraus erwächst ein erheblicher Forschungsbedarf.³

Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zählen zu diesen Neuentwicklungen, die vor allem im Fassadenbau einen Beitrag zum ressourcenschonenden Materialeinsatz leisten können. Holz weist in Bezug auf den Primärenergiegehalt entscheidende Vorteile gegenüber den etablierten Fassadenmaterialien wie Stahl oder Aluminium auf, bei deren Herstellung sehr viel Energie verbraucht wird.⁴ Die Verwendung von Holz in der Fassadenkonstruktion verringert folglich – bezogen auf dessen Gesamtlebenszyklus – den Energieverbrauch eines Gebäudes.

Die schubfeste Verbindung zwischen Holz und Glas wird in den betrachteten Verbundelementen durch eine umlaufende, lastabtragende Klebung erzielt. Durch das duktile Tragverhalten des so geschaffenen Verbundsystems aus Verglasung und Rahmen lässt sich die Zugfestigkeit von Glas deutlich stärker ausnutzen. Das Konzept wird etwa bei Holz-Glas-Verbundträgern mit transparentem Steg oder bei aussteifenden Fassadenelementen angewendet.

Bei den Aussteifungselementen werden die horizontalen Lasten kontinuierlich über eine umlaufende Klebverbindung

³ Natterer (2013, S. 47 ff.) weist beispielsweise in seinem Kommentar: „Einfach- und Hightech-Konstruktionen aus Holz – Eine Chance für energie- und nachhaltigkeitsbewusstes Bauen“ auf die Notwendigkeit intensiver Forschungen zu neuen Techniken und Materialvarianten im Ingenieurholzbau hin.

⁴ Der Primärenergiegehalt (PEI) in MJ/m³ von Aluminium beträgt mehr als das eintausendfache des PEI von Konstruktionsholz aus Kiefer. Dieser Wert muss allerdings wegen der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit beider Materialien differenzierter betrachtet werden. Wird beispielsweise ein Bauteil mit einer bestimmten Zugfestigkeit benötigt, so liegt der Energieeinsatz bei der Verwendung von Aluminium um den Faktor 20 über dem von Holz. Vergleiche Hegger 2007, S. 160.

in die Verglasung eingeleitet. Dadurch wird das Glas vorrangig als Schubfeld in der Scheibenebene beansprucht. Bild 1 zeigt den typischen Aufbau eines solchen Bauteils, das aus einem bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben hervorgegangen ist. Die Pfosten und Riegel der Unterkonstruktion bestehen aus Holz oder Holzwerkstoffen. Ein Adapter, der oftmals auch als Koppelleiste bezeichnet wird, ermöglicht das Kleben im Schutz einer Produktionshalle. Die Leiste, die aus Furniersperrholz besteht, wird dort bereits mit dem Glas verklebt. Die vorbereiteten Elemente lassen sich dann vor Ort einfach an die Fassadenunterkonstruktion montieren und bei Beschädigung wieder austauschen.

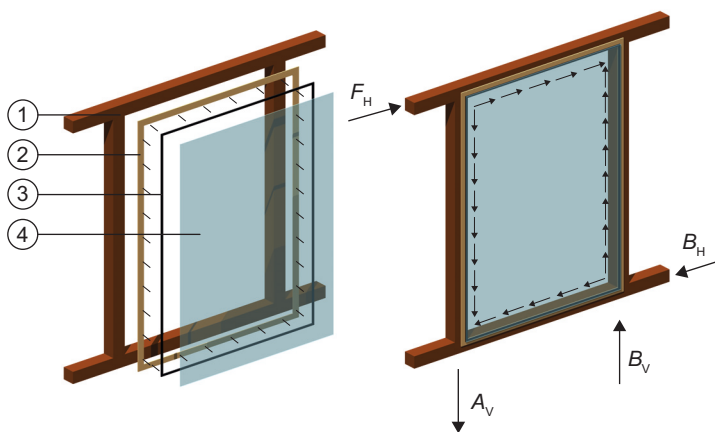


Bild 1

Prinzipaufbau eines Holz-Glas-Verbundelements nach Edl (2008, S. 18). Die Pfeile zeigen die Beanspruchung des Elements infolge der Aussteifungslast F_H .

- 1 Holzunterkonstruktion
- 2 optionale Koppelleiste mit Verschraubung
- 3 Klebfuge
- 4 Verglasung

Das System wurde von der Holzforschung Austria (HFA) patentiert (AT 502470).

Solche tragenden Bauteile aus Glas bedürfen jedoch einer speziellen konstruktiven und planerischen Behandlung. Um ein unkontrolliertes Bauteilversagen zu verhindern, sind eine ausreichende Resttragfähigkeit der Verglasung und die Ausbildung eines redundanten Tragsystems erforderlich. Durch die Verbindung des spröden und linear elastischen Werkstoffs Glas mit Holz lässt sich die Resttragfähigkeit der Verglasung entscheidend erhöhen. Die umlaufende Klebverbindung weist dabei im Vergleich zum Holz oder Glas den wohl noch größten Untersuchungsbedarf auf.

Im Bauwesen spielt das lastabtragende Kleben aber noch eine untergeordnete Rolle. Gegenwärtig wird hier Glas vielfach mittels kraft- und formschlüssiger Verbindungstechniken gefügt. Der Einsatz von Schrauben oder Klemmen erweist sich dabei als nur bedingt materialgerecht und fördert die gewünschte Transparenz nicht konsequent genug. Adhäsive Verbindungen, die über den Stoffschluss zwischen

den Fügeteilen einen homogenen Kraftfluss bei gleichzeitiger Verminderung örtlicher Spannungsspitzen ermöglichen, eignen sich dagegen weitaus besser für das spröde Material. Das Anwendungspotenzial und die damit verbundenen technologischen und wirtschaftlichen Vorteile des Klebens sind folglich im Glasbau bei Weitem nicht ausgeschöpft.

Nicht zuletzt fehlen auch beim Holz Kenntnisse zum Kleben in Fassadenanwendungen. Holz weist eine geringere Beständigkeit bei Feuchteeinwirkung im Vergleich zu Metallen auf. Der äquivalente Einsatz von Holz anstelle von konventionellen Materialien in der Fassadenunterkonstruktion bedarf daher teilweise noch detaillierter Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit und zum Feuchteinfluss sowie der Gestaltung von geeigneten konstruktiven Details.

Der Blick auf die bisherigen Forschungsarbeiten zum Holz-Glas-Verbund zeigt, dass die Entwicklung stark von der Verwendung elastischer Klebungen geprägt ist.⁵ Basierend auf dem erfolgreichen Einsatz von Silikonklebstoffen für Structural-Sealant-Glazing-Systeme (SSG) konnte die Eignung auch für Holz-Glas-Klebungen nachgewiesen werden. Silikone zeigen nur eine geringe Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften und zeichnen sich darüber hinaus durch eine gute Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen aus. Auf Basis der vielversprechenden Ergebnisse wurden bereits erste Pilotprojekte errichtet, die sich dieser neuen Technologie bedienen (Bild 2).

Allerdings treten schon unter geringen Belastungen relativ große Verformungen in der Klebverbindung auf.⁶ Aussteifungssysteme für Gebäude oder Fassaden – wie beschrieben ein potenzielles Anwendungsfeld für den Holz-Glas-Verbund – benötigen aber gerade eine gewisse Steifigkeit, um Lasten abzutragen oder um die Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit auf das erforderliche Maß

⁵ Elastische Klebungen bei Holz-Glas-Verbundkonstruktionen werden u.a in folgenden Arbeiten untersucht: Blyberg 2012, Hochhauser 2011a, Neubauer 2011, Edl 2008, Schober 2007 und 2006, Niedermaier 2005, Kreher 2004a, Hamm 1999.

⁶ Eine Beispielrechnung verdeutlicht, dass die Silikonklebfuge bei Erreichen der Gebrauchstauglichkeitsgrenze in einem typischen Holz-Glas-Verbundelement nur zu 30 % ausgelastet ist. (Vergleiche Hochhauser 2013, S. 192 f.)

zu begrenzen. Hinzu kommt, dass der Tragwiderstand der Klebverbindung unter lang anhaltenden Lasten nur ein Bruchteil der Kurzzeitfestigkeit beträgt. Zum Erreichen des baurechtlich geforderten Sicherheitsniveaus sind aufgrund des begrenzten Kenntnistanandes zum Langzeitverhalten vielfach noch zusätzliche Befestigungen erforderlich, welche die Verglasung bei Versagen der Klebfuge sichern oder das Eigengewicht abtragen.



Bild 2

Pilotprojekt mit Holz-Glas-Verbundfassade. Wohnhaus Schattenbox in Eichgraben bei Wien. Teile der Fassade tragen zur Aussteifung des Gebäudes bei.

© Dold und Hasenauer OG

Geeignete Klebstoffe für Holz-Glas-Verbundelemente basieren gänzlich oder teilweise auf organischen Verbindungen. Diese Klebstoffe weisen hinsichtlich des chemischen Aufbaus und der Materialeigenschaften starke Parallelen zu Kunststoffen auf und werden den organischen Polymerverbindungen zugeordnet, die im Allgemeinen ein viskoelastisches Verformungsverhalten zeigen.⁷ Klebstoffe neigen deshalb unter Dauerlasten zu Kriech- und Fließverformungen. Kriech- und Relaxationsversuche sind sehr zeitintensiv. Der Erfahrungsschatz ist daher immer noch begrenzt.

Für den Nachweis einer tragenden Klebung muss das Klebstoffverhalten unter Umwelteinwirkungen und Dauerlasten bekannt sein. In der vorliegenden Arbeit sollen diesen Fragestellungen unter Berücksichtigung von höherfesten Klebstoffen nachgegangen werden, die eine wesentliche Verbesserung des Tragverhaltens insbesondere durch die Reduzierung der Verformungen erwarten lassen.

⁷ Vergleiche Habenicht 2006, S. 7.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, die Anwendbarkeit von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas-Verbundelementen eingehend zu untersuchen. Der Fokus für den baupraktischen Nutzen soll dabei auf aussteifende Bauteile in der Gebäudehülle gerichtet werden. Bei Klebverbindungen aus elastischen Silikonen treten hier bereits unter geringer Horizontalbelastung sehr große Verformungen auf. Mit der Erweiterung des Untersuchungsspektrums auf höherfeste Industrieklebstoffe soll ein Beitrag zur Optimierung des Tragverhaltens von Holz-Glas-Verbundelementen geleistet werden. Mit den verbesserten Trageigenschaften erweitert sich deren bestehende Anwendungspalette. Beispielsweise könnten dann auch mehrgeschossige Gebäude mit aussteifenden Holz-Glas-Verbundfassaden realisiert werden.

Durch die Verwendung der steifen Klebstoffe sollen die Kopfverschiebung der Aussteifungselemente minimiert und die Tragfähigkeit der Klebverbindung unter kurzzeitigen und lang anhaltenden Einwirkungen gesteigert werden. Insbesondere wird dabei eine stärkere Ausnutzung der Tragreserven der Komponenten Glas, Holz und Klebstoff angestrebt. Eine höhere Materialeffizienz wird erreicht, wenn bei der Bemessung die Tragfähigkeit anstelle der Verformung maßgebend wird. Dazu müssen vorher die baurechtlichen Rahmenbedingungen und die Auswirkungen der versteiften Bauteile auf das Verhalten des Gesamttragwerks erörtert werden.

Für die Klebstoffsysteme, die neu beim Holz-Glas-Verbund angewendet werden sollen, liegen noch keine ausreichenden Erkenntnisse zu den mechanischen Eigenschaften, zum Haftverhalten und zur Alterung vor. Daher wird ein umfassender Nachweis anhand im Glas- und Fassadenbau gebräuchlicher Prüfverfahren erforderlich. Die Langzeitstabilität und das Alterungsverhalten haben einen entscheidenden Einfluss auf die Einsatzfähigkeit der Materialien. Unter dem Begriff der Alterung wird in diesem Zusammenhang die Gesamtheit der irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Prozesse verstanden, welche über die Lebensdauer einer geklebten Verbindung zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften führen und potenziell die Anwendbarkeit der Materialien beeinträchtigen. Einflüsse entstehen aus den einwirkenden Umgebungsbedingungen wie

Temperatur, ultravioletter Strahlung oder Feuchtigkeit. Zusätzlich sollen weitere Anforderungen, die sich aus der Herstellung, Montage und Nutzung der Verbundelemente ergeben, in die Bewertung der Klebstoffe einfließen.

Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung von Einflüssen aus langandauernden mechanischen Beanspruchungen. Die Dauerhaftigkeit und Beanspruchbarkeit der Verbindung soll experimentell ermittelt werden. Die tragende Klebverbindung der Holz-Glas-Verbundelemente ist äußeren Beanspruchungen ausgesetzt, die sich in Einwirkungshöhe und Einwirkungsdauer unterscheiden. Aufgrund der Komplexität der Einflüsse oder möglicher Wechselwirkungen lassen sich Lebensdauervorhersagen für Klebstoffe auf Grundlage des vorhandenen Kenntnisstandes nur schwer verallgemeinern.⁸ Für die sichere Auslegung geklebter Verbindungen ist daher eine Untersuchung des zeitabhängigen Materialverhaltens der Klebstoffe unter mechanischer Beanspruchung unerlässlich.

Mit den Langzeituntersuchungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt werden, wird das Ziel verfolgt, bestehende bauaufsichtliche Hürden schrittweise abzubauen. Die Erkenntnisse sollen dazu beitragen, dass die Klebverbindung bei Holz-Glas-Verbundelementen zukünftig ohne zusätzliche mechanische Tragelemente realisiert werden kann. Das Eigengewicht und alle anderen ständigen Einwirkungen trägt dann ausschließlich die Klebung ab. Dazu muss der Tragwiderstand der Klebverbindung mit größerer Zuverlässigkeit ermittelt werden. Mechanische Sicherungssysteme dürften entfallen, wenn ein Versagen der Klebverbindung mit der im Bauwesen üblichen Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

Neben der wissenschaftlichen Abhandlung des Themas sollen die gewonnenen Erkenntnisse auch die Arbeit von Architekten, Planern und ausführenden Unternehmen erleichtern, die Holz-Glas-Verbundkonstruktionen bei einem Bauvorhaben einsetzen möchten. Einige Richtlinien zur experimentellen Untersuchung und spezielle Nachweisverfahren für Holz-

⁸ Vergleich Grellmann 2005, S. 179.

Glas-Verbundelemente existieren bereits.⁹ Ziel ist es, diese derart zu adaptieren und zu ergänzen, dass die besonderen Anforderungen und Eigenschaften einer steiferen Klebverbindung berücksichtigt werden.

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Teilziele, die mit der vorliegenden Arbeit erreicht werden sollen:

- Erörterung der baurechtlichen Zusammenhänge für die unregelte Bauart des Holz-Glas-Verbunds
- Erhöhung der Gesamtsteifigkeit von Holz-Glas-Verbundelementen und Steigerung der Materialeffizienz
- Klären des Einflusses der Klebschichtsteifigkeit auf das Verhalten des Verbundbauteils und dessen Interaktion mit dem Tragsystem
- Grundlegende Überprüfung und Charakterisierung einer Klebstoffvorauswahl zur Abgrenzung potenziell geeigneter höherfester Klebstoffe für den Holz-Glas-Verbund
- Bewertung der Nutzungssicherheit der gewählten Klebstoffe auf Basis von üblichen Zulassungsverfahren und Eignungsprüfungen im Glas- und Fassadenbau
- Experimentelle Überprüfung des Tragverhaltens der Klebverbindungen unter langandauernder mechanischer Beanspruchung
- Aufstellen von Handlungsempfehlungen für die baupraktische Anwendung

Die auf diesem Weg angewendeten und entwickelten Verfahren und Charakterisierungsmethoden sollen zukünftig die Bewertung der Nutzungssicherheit von aussichtsreichen Klebstoffen für den Holz-Glas-Verbund erleichtern.

1.3 Abgrenzung

Eine Vielzahl der bisherigen Forschungsarbeiten zum Holz-Glas-Verbund konzentriert sich auf Klebstoffe mit großem Verformungsvermögen – vorzugsweise Silikonklebstoffe für Structural-Sealant-Glazing-Systeme. Nur vereinzelt werden andere Klebstoffe näher untersucht. Die vorliegende Arbeit erweitert dieses Spektrum um die dezidierte Betrachtung der

9 ift-Richtlinie VE-08/2 – Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme und Leitfaden zur Berechnung und Bemessung von Holz-Glas-Verbundscheiben bei Hochhauser (2011a, S. 478).

Eignung von steiferen Klebstoffen. Dennoch werden zu Referenzzwecken elastische Klebstoffe geprüft, mit dem Ziel vergleichende Aussagen herzuleiten.

Zahlreiche Arbeiten verweisen zudem im Ausblick auf die Notwendigkeit weiterer Langzeitstudien.¹⁰ Hieran wird angeknüpft, indem sich der Fokus dieser Untersuchungen gerade auf das angesprochene Langzeitverhalten richtet. Dessen Beurteilung erweist sich aufgrund der spezifischen Materialeigenschaften der Klebstoffe als sehr komplex. Thermische und hygrische Beanspruchungen beeinflussen zusätzlich das Materialverhalten. Die Zeitstanduntersuchungen beschränken sich hier wegen der vielfältigen Einflussgrößen auf die Parameter Last und Zeit. Auswirkungen des Umgebungsklimas werden überwacht.

Der betrachtete Anwendungsbereich wird durch Holz-Glas-Verbundelemente in der Fassade definiert. Der Verbund zwischen Holz und Glas wird dabei ausschließlich über die umlaufende Klebung erzeugt. Ein planmäßiger Lastabtrag über Klotzungen oder andere mechanische Halterungen ist nicht vorgesehen. Konstruktion und Anwendungsbereich werden genau abgegrenzt, um das Anforderungsprofil präzise zu definieren und das Versuchsprogramm exakt auszurichten.

Neue Untersuchungen zur Kantenfestigkeit und zum Stabilitätsversagen von Verglasungen sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Hier wird auf die Erkenntnisse weiterer Forschungsarbeiten verwiesen.¹¹

1.4 Vorgehensweise

Das grundlegende Vorgehen bei der Bearbeitung des Dissertationsthemas ist in Bild 3 dargestellt. Den Ausgangspunkt bildet die detaillierte Betrachtung der Holz-Glas-Verbundbauweise in Kapitel 2. Die grundlegenden Trag- und Konstruktionsprinzipien werden erläutert und verschiedene Anwendungsfelder vorgestellt. Neben dieser Übersichtsdar-

¹⁰ Vergleiche u. a. Hochhauser 2011b, S. 142 und Blyberg 2011b, S. 22.

¹¹ Mit stabilitätsgefährdeten Verglasungen zur Aussteifung von Tragwerken beschäftigen sich u. a. die Arbeiten von Bedon (2013), Huveners (2009), Wellershoff (2008) und Luible (2004).

stellung werden die spezifischen Anforderungen für ein geklebtes Aussteifungselement aus Holz und Glas in der Fassade definiert. Diese umfassen neben funktionalen, ästhetischen und konstruktiven Gesichtspunkten auch Belange, die für die Herstellung, die Montage und den Austausch der Elemente von Bedeutung sind.

Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zählen aufgrund der tragenden Klebverbindung zu den unregelmäßigen Bauarten. Das Bauprodukt Klebstoff findet sich ebenso in keiner Norm. Daher müssen die wesentlichen baurechtlichen Zusammenhänge und Planungsstrategien im konstruktiven Glasbau erfasst sein, um das Programm für die Untersuchung der Verbundelemente passgenau auszurichten und die Handlungsempfehlung für deren baupraktische Anwendung präzise zu formulieren. In Kapitel 3 werden daher die Grundlagen zur Verbindungstechnologie Kleben im Kontext des konstruktiven Glasbaus erläutert. Ausgewählte Anwendungsbeispiele dokumentieren den Entwicklungsstand. Die vorgestellten geklebten Verglasungen werden nach Konstruktionstyp und Beanspruchungsart klassifiziert. Die Zuordnung der Holz-Glas-Verbundfassade in eine entsprechende Kategorie dient der Konkretisierung des Anforderungsprofils.

Die Beanspruchung eines tragenden Bauteils wird üblicherweise projektspezifisch bestimmt. Die Aussagen, die aus den experimentellen und theoretischen Untersuchungen zum Holz-Glas-Verbund abgeleitet werden, sollen im Gegensatz dazu aber möglichst allgemeingültig sein. Dafür wird ein klares Bild über die tatsächlichen Beanspruchungen, die Beanspruchungshöhe und die prozentualen Lastanteile mit veränderlicher und ständiger Einwirkungsdauer benötigt. Die parametrisierte Beanspruchungsanalyse in Kapitel 4, die sich dem Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf das Tragverhalten eines Modellgebäudes widmet, liefert dazu wichtige Anhaltspunkte. Aus den Ergebnissen der Studie werden Steifigkeitsbereiche für die Klebstoffauswahl abgeleitet.

Die Klebstoffeigenschaften wirken sich entscheidend auf das globale Tragverhalten des Verbundelements und die Dauerhaftigkeit der Verbindung aus. Anhand definierter Auswahlkriterien, die speziell auf Fassadenelemente in Holz-Glas-Verbundbauweise zugeschnitten sind, werden sieben marktübliche Klebstoffsysteme für die experimentellen Untersuchungen ausgewählt.

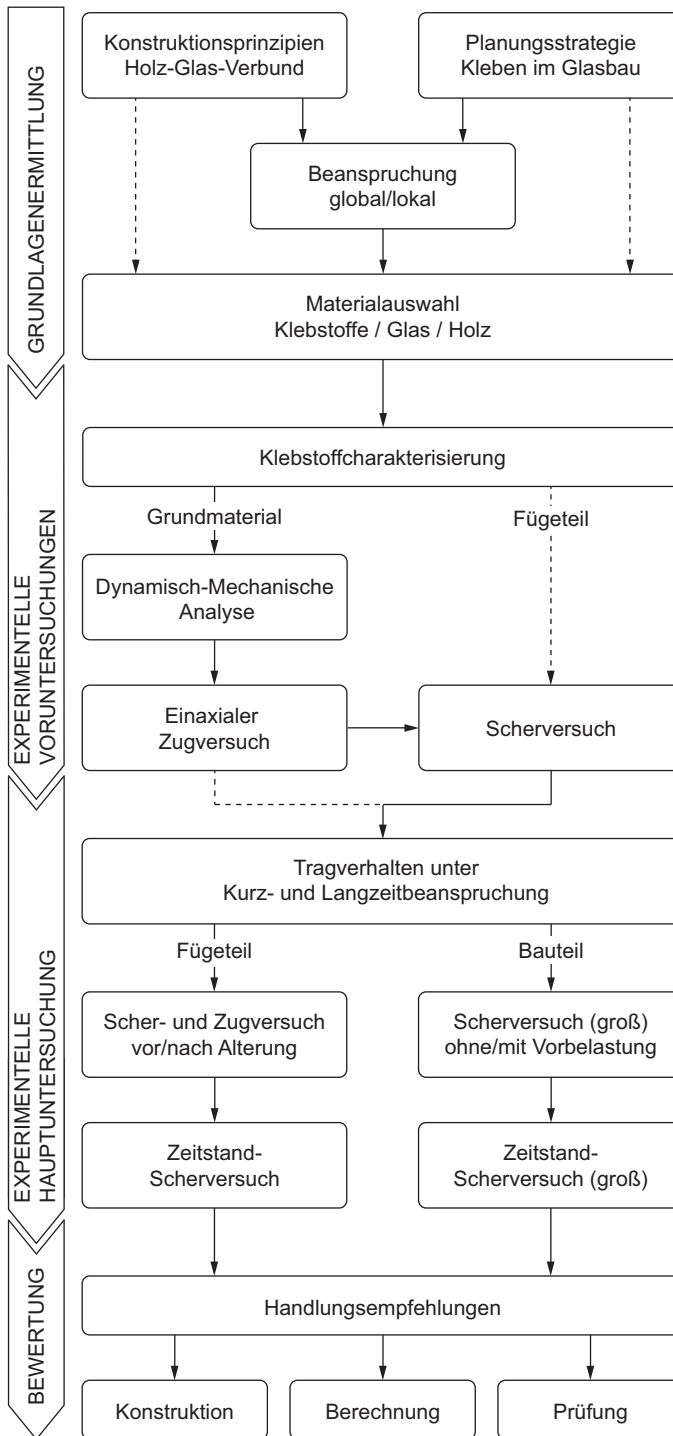


Bild 3
Vorgehensweise bei den theoretischen und experimentellen Untersuchungen.

Der experimentelle Teil der Arbeit beginnt mit der Materialcharakterisierung und Kennwertermittlung an Substanzproben der ausgewählten Klebstoffe. Darauf folgen statische Kurzzeitversuche an kleinen Holz-Glas-Scherprüfkörpern, an denen die Haftfestigkeit und das Verformungsvermögen im Anwendungstemperaturbereich bestimmt werden. Auf Grundlage der Ergebnisse lässt sich die Klebstoffauswahl für eine detaillierte Überprüfung und die zeitaufwendigen Langzeitversuche eingrenzen. Drei Klebstoffe werden weiter untersucht. Die zugehörigen Ergebnisse werden in Kapitel 5 dargestellt und diskutiert.¹² Zusätzlich finden sich dort die wichtigsten Materialeigenschaften der Fügebauteile und die Herstellerangaben zu den Klebstoffen.

Die Hauptuntersuchungen gliedern sich dann in zwei parallele Stränge, deren Einteilung nach dem Betrachtungsmaßstab erfolgt. Auf der einen Seite werden eine Vielzahl kleiner Prüfkörper unter Zug- und Scherbeanspruchung getestet. Das Prüfprogramm sieht verschiedene Szenarien der künstlichen Alterung mit anschließender Prüfung der Restfestigkeit vor. Auf der anderen Seite stehen Versuche an großen Scherprüfkörpern mit bauteilähnlicher Klebfugengeometrie.

Die Untersuchungen im Labormaßstab, die in Kapitel 6 dokumentiert sind, dienen der Beurteilung der prinzipiellen Eignung der Klebstoffe. Hierbei werden zwei Holzarten eingebunden und ungealterte und gealterte Proben untersucht. Die künstliche Alterung orientiert sich an den Vorgaben der ETAG 002-1 und der ift-Richtlinie VE-08 zu geklebten Verglasungssystemen. Diese Richtlinie wird explizit für den Holz-Glas-Verbund empfohlen.¹³ Das Kriechverhalten der kleinen Prüfkörper wird in Zeitstandversuchen bestimmt.

Kapitel 7 berichtet dann über die Versuche an Prüfkörpern mit wirklichkeitsnaher Klebfugengestalt.¹⁴ Das Kapitel enthält auch eine ausführliche Beschreibung der Kriechprüfanlage, die eigens für diese Versuchsserie konzipiert und gebaut wurde. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 8 beurteilt und in Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

¹² Auszüge aus dem Kapitel wurden bei Nicklisch (2014) und bei Weller (2013b) veröffentlicht.

¹³ Vergleiche Hochhauser 2011a, S. 524 ff.

¹⁴ Auszüge aus dem Kapitel wurden bei Nicklisch (2015a) veröffentlicht.

2 Die Holz-Glas-Verbundbauweise

2.1 Tragprinzip und Wirkungsweise

Verbundbauteile bestehen aus mindestens zwei unterschiedlichen Materialien. Infolge einer schubfesten Verbindung zwischen den einzelnen Komponenten entfaltet sich eine gemeinsame Tragwirkung. Materialverbunde sind daher leistungsfähiger als die bloße Materialschichtung. Häufig können im Verbund auch ungünstige Eigenschaften des Grundmaterials durch die positiven Eigenschaften eines zweiten Materials kompensiert werden. Der Holz-Glas-Verbund ist eine solche neuartige Verbundbauweise (Bild 4). Mit ihr lässt sich das Tragvermögen im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionen, wie beispielsweise reinen Glasträgern oder Pfosten-Riegel-Fassaden, steigern.



Bild 4

Materialstudien zum Holz-Glas-Verbund. Glas und Holz werden an den Glas-kanten miteinander verklebt, um eine gemeinsame Tragwirkung zu erzielen. Darüber hinaus ist der spannende Kontrast zwischen den Werkstoffen auch aus architektonischer Sicht reizvoll.

Foto: Stefanie Flohr

Glas weist aufgrund seiner spezifischen Oberflächendefekte nur eine geringe Zugfestigkeit auf. Die praktisch erzielbare Festigkeit von Flachglas beträgt nur 0,5 bis 1,0 % des theoretischen Werts.¹⁵ Gleichzeitig verhält es sich linear elastisch und versagt spröde. Holz dagegen ist in Faserrichtung sehr gut auf Zug beanspruchbar. In Kombination lässt sich dieser Vorteil nutzen, um beispielsweise ein duktileres Tragverhalten bei einem Glasträger zu erzielen. Bei Glasversagen werden die Kräfte auf das Holzprofil in der Zugzone übertragen und die Risse von diesem überbrückt.

¹⁵ Vergleiche Petzold 1990, S. 36.

Die Holz-Glas-Verbundbauweise eignet sich besonders für Anwendungen bei denen Glas in der Scheibenebene beansprucht wird. Dazu zählen unter anderem Glasträger und aussteifende Verglasungen. Weitspannende Horizontalverglasungen, die durch Holzprofile verstärkt werden, zählen zusätzlich zu den Anwendungsmöglichkeiten. Verbundstützen aus Holz und Glas sind grundsätzlich ebenfalls denkbar. Das Holz wird in diesem Fall nicht auf Zug sondern auf Druck beansprucht. Das Anwendungspotenzial wird wegen des Stabilitätsversagens ohne überkritische Reserve jedoch als eher gering eingeschätzt.

Die einzelnen Bestandteile eines Holz-Glas-Verbundelements sind kontinuierlich miteinander verklebt. Das Holz oder der Holzwerkstoff wird in der Regel entlang der Verglasungskanten angebracht. Bei hoher Beanspruchung der Verglasung infolge von Plattenbiegung kann auch eine Anordnung auf der zugbeanspruchten Glasoberfläche sinnvoll sein. Durch die schubfeste Verbindung soll grundsätzlich ein duktileres Tragverhalten erreicht werden. Voraussetzung dafür ist eine entsprechende statische Auslegung der Holzquerschnitte und der Klebverbindung. Nach dem Versagen des Glases muss eine ausreichende Tragreserve bestehen, um die umgelagerten Kräfte aufnehmen zu können.

Neben der Erhöhung von Traglast und Resttragfähigkeit ergeben sich weitere Vorteile im Vergleich zu einem reinen Glasbauteil. Die kontinuierliche Klebverbindung ermöglicht eine homogene und materialgerechte Lasteinleitung ins Glas. Spannungsspitzen, wie sie beispielweise bei Punkthaltern auftreten, können vermieden werden. Die homogene Materialausnutzung erlaubt so eine wirtschaftlichere Dimensionierung der Verglasungen. Darüber hinaus können konventionelle Fügetechniken für Holz zum Anschluss an angrenzende Bauteile genutzt werden. Das vereinfacht die Konstruktion und die Montage solcher Elemente.

Der nachfolgende Abschnitt geht detailliert auf die Anwendungsmöglichkeiten der Holz-Glas-Verbundbauweise ein. Die wesentlichen Konstruktionsprinzipien werden erläutert und der Stand der Technik dokumentiert. Ergänzend werden allgemeine Grundlagen zu Glasverbunden besprochen. Für diese Arbeit relevante Erkenntnisse und Entwicklungsschritte werden aus den zitierten Forschungsarbeiten herausgearbeitet und in Abschnitt 2.5 zusammengefasst.

2.2 Forschungsschwerpunkte und Anwendungen

2.2.1 Geklebte Verglasungssysteme für Fenster

Große Fenster lassen sich deutlich effizienter gestalten, wenn das Glas und der Rahmen miteinander verklebt werden (Bild 5). In herkömmlichen Fenstersystemen dient die Verglasung lediglich als transparentes Füllmaterial und wird auf Kunststoffklotze gelagert. Das Flügelprofil muss dann so dimensioniert werden, dass es das Glasgewicht allein trägt. Wird ein Verbund zwischen Glas und dem Rahmen aus Holz hergestellt und die Tragwirkung des Glases genutzt, können auch große und schwere Fensterverglasungen mit sehr schlanken Rahmenprofilen realisiert werden.¹⁶



Bild 5

Geklebtes Fenster (System walchfenster04). Das Stufenisoliertglas ist mit dem Holzrahmen verklebt und schützt so das Holz vor Witterungs- und Umwelteinflüssen. Die Aussteifung durch die Glasscheibe ermöglicht schlanke Holzrahmen und eine hohe Verwindungsstabilität.

Foto: Walch GmbH

Die Verbundwirkung bezieht sich bei dieser Anwendung jedoch nur auf das einzelne Fenster. Mit geklebten Fenstern lässt sich eine Tragstruktur lediglich ausfachen.¹⁷ Somit zählen sie nicht direkt zu den Holz-Glas-Verbundkonstruktionen, die als Teil eines Tragwerks verstanden werden. Im Rahmen dieser Arbeit sind aber die für geklebte Fenster erarbeitete

¹⁶ Vergleiche Lieb 2009, S.10.

¹⁷ Definition nach DIN 18008-1, 3.1.1: Eine ausfachende Glasscheibe erfährt planmäßig nur Beanspruchungen aus ihrem Eigengewicht und den auf sie entfallenden Querlasten (Wind, Schnee usw.).

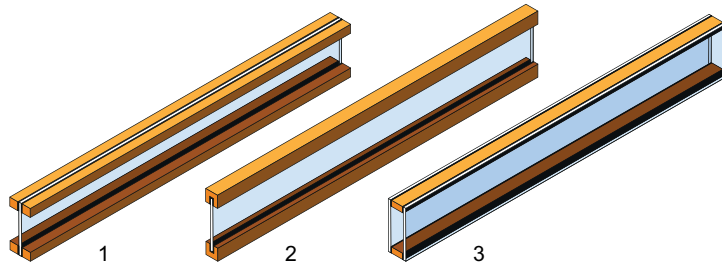
Richtlinien und Prüfvorschriften¹⁸ relevant. Da Fassaden und Fenster den gleichen Umwelteinwirkungen ausgesetzt sind, können die Beurteilungsgrundlagen zum Teil auch auf tragende Holz-Glas-Verbundbauteile übertragen werden.

2.2.2 Träger

Holz-Glas-Verbundträger eignen sich beispielsweise als Tragwerk für verglaste Atrien oder für andere transparente Dachkonstruktionen. Die meisten Querschnittsvarianten, die in den vergangenen Jahren entwickelt und untersucht worden sind, orientieren sich an der klassischen Form des I-Profils, wobei der Steg aus Glas und die Flansche aus Vollholz oder einem Holzfurnierwerkstoff ausgebildet werden (Bild 6). Träger mit zusammengesetzten Querschnitten aus Holz und Glas weisen im Allgemeinen ein besseres Resttragvermögen im Vergleich zu reinen Glasträgern mit gleichen Dimensionen auf.

Bild 6
Holz-Glas-Verbundträger.
Prinzipdarstellung verschiedener Konstruktionstypen:

- 1 I-Träger mit geteilten Flanschen
- 2 I-Träger mit geschlitzten Flanschen
- 3 Kastenträger



Denkbar ist auch die Anwendung der gezeigten Verbundquerschnitte in der Vertikalen. Solche sogenannten Glaschwerter dienen zur Aussteifung von Ganzglasfassaden. Der wesentliche Unterschied zu einem Glasträger besteht in der Beanspruchungsdauer der einwirkenden Lasten. Glaschwerter werden fast nur von Lasten mit kurzer Wirkungsdauer beansprucht. Auf einen horizontalen Träger wirken dagegen Lasten von mittlerer bis ständiger Dauer.

Erste Entwicklungen zu Holz-Glas-Verbundträgern gehen auf Forschungsarbeiten¹⁹ an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) zurück. Dort wurden Vier-

¹⁸ Die ift-Richtlinie VE-08/3 „Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme“ ist die technische Grundlage für die Prüfung und Anwendung von geklebten Fenstern.

¹⁹ Kreher 2004a und Hamm 1999.

Punkt-Biegeversuche an Trägern mit zweiteiligem Ober- und Untergurt (Bild 6, Typ 1) aus Furnierschichtholz durchgeführt.²⁰ Die Prüfkörper mit einem Steg aus monolithischem Floatglas (FG) wiesen ein duktileres Tragverhalten auf. Vor Auftreten des ersten Risses beziehungsweise Rissbündels zeigten diese ein linear-elastisches Verformungsverhalten. Mit zunehmender Belastung entstanden neue Rissbündel, welche die Gesamtsteifigkeit des Trägers sinken ließen. Die Verformung in Feldmitte wuchs überproportional zur Last. Das Rissbild war relativ regelmäßig (Bild 7). Die Träger versagten schließlich entweder durch das Ausbrechen größerer Glasscherben oder durch die Überbeanspruchung des Untergurtes aus Holz im Bereich eines überbrückten Risses. Die erzielten Tragfähigkeitsreserven waren deutlich. Im Mittel konnte die Last nach dem ersten Riss noch um den Faktor 3 gesteigert werden, bis der Träger endgültig versagte.²¹ Voraussetzung dafür war die ausreichende Dimensionierung der Holzgurte, welche die Zugkräfte an den Rissursprüngen an der Glaskante aufnehmen.



Bild 7

Holz-Glas-Verbundträger nach Biegeversuch. Gut zu erkennen sind die regelmäßig verteilten Rissbündel im mittleren Teil des Trägersteiges. Der Träger wurde nicht bis zum Totalversagen beansprucht.

Foto: Klaus Kreher

Auf Basis dieses ersten Forschungsprojekts wurden weitere Träger getestet. Im Fokus stand der Einfluss des Vorspanngrades der verwendeten Gläser auf das globale Tragverhalten. Wegen des veränderten Bruchverhaltens verringerte sich erwartungsgemäß die Resttragfähigkeit der Träger mit Stegen aus thermisch vorgespannten Glasarten bei gleichzeitig höheren Glasbruchlasten im Vergleich zu Trägern aus

²⁰ Vergleiche Hamm 1999, S. 72 ff.

²¹ Vergleiche Hamm 1999, S. 75 ff.

normal gekühltem Floatglas.²² Die kleineren Bruchstücke bei teilvorgespanntem Glas (TVG) beziehungsweise krümeligen Bruchstücke bei Einscheibensicherheitsglas (ESG) führten dazu, dass der monolithische Glassteg kurz nach dem Bruch zerfiel. Die Last auf die Träger mit teilvorgespanntem Glas oder Einscheibensicherheitsglas ließ sich danach nicht weiter steigern. Ein Resttragvermögen bei einer Belastung unterhalb des Initialbruchniveaus konnte nicht bestimmt werden, da die Versuche kraftgesteuert gefahren wurden. Erstmals wurden auch Kriechversuche an einzelnen Trägern durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass unter konstanter Last die Verformungen zunehmen und sich asymptotisch an einen Grenzwert annähern. Durch die Kriechverformungen in der Klebfuge vermindert sich die Verbundtragwirkung. Es kommt zu einer Lastumlagerung vom Holz- auf den Glasquerschnitt.²³ Die Erkenntnisse fanden Anwendung bei einem Hotelbau für die Schweizer Landesausstellung Expo.02. Holz-Glas-Verbundträger überspannen das Dach über dem Zentralgebäude des Hotels (Bild 8).

Bild 8

Hotel Palafitte in Monruz (CH). Die Holz-Glas-Verbundträger tragen das Dach des Gebäudes. Der Querschnitt setzt sich aus einem knapp 600 mm hohen und 12 mm dicken Steg aus monolithischem ESG sowie seitlich auf das Glas geklebten Holzprofilen zusammen. Die Spannweite beträgt etwa 6 m. Der Glassteg ist am Auflager auf der Außenwand unterbrochen, um eine Wärmebrücke zwischen dem Innenfeld und dem Kragarm außen zu vermeiden. Aus Brandschutzgründen musste der Obergurt für den Brandfall dimensioniert werden. Die Tragfähigkeit des reinen Holzquerschnitts genügt, um die Resttragfähigkeit sicherzustellen.²⁴

Foto: Klaus Kreher



²² Vergleiche Kreher 2004a, S. 134.

²³ Vergleiche Kreher 2004a, S. 138 ff. und S. 145.

²⁴ Vergleiche Kreher 2004b, S. 149 ff.

Die Holz-Glas-Verbundbauweise stand auch im Zentrum eines Forschungsvorhabens an der Universität Minho in Portugal. Auf Basis eines modularen architektonischen Konzeptes wurden verschiedene Elemente für ein Baukastensystem entwickelt.²⁵ In Bauteilversuchen wurden unter anderem Träger mit I-Querschnitt und mit Kastenquerschnitt (Bild 6, Typ 1 und Typ 3) geprüft. Bei beiden Varianten wurde Verbund-Sicherheitsglas aus Floatglas verwendet. Der Vergleich der beiden Trägertypen zeigte, dass zwar beim Kastenquerschnitt aufgrund des doppelten Glasanteils der erste Riss im Glas bei höheren Lasten auftritt als beim I-Querschnitt, die maximale Traglast aber in etwa auf gleichem Niveau liegt.²⁶ Die Anzahl der getesteten Träger ist zu gering, um daraus eine statistisch gesicherte Aussage ableiten zu können. Dennoch ist die Tendenz ablesbar, dass die Resttragfähigkeit durch eine reine Erhöhung des Glasanteils im Querschnitt nicht signifikant gesteigert werden kann.

Weitere Holz-Glas-Verbundträger wurden an der Linnæus University Växjö in Schweden untersucht. Der Trägeraufbau zeigt große Ähnlichkeiten zu den bisher aufgezählten Forschungsarbeiten. Allerdings wird die Geometrie der Flansche modifiziert. Der Flanschquerschnitt wird nicht geteilt, sondern besteht aus einem geschlitzten Furnierschichtholz, in das der Glassteg eingeklebt wird (Bild 6, Typ 2). Die Ergebnisse ähneln in Bezug auf das Bruchbild und das Resttragvermögen den vorangegangenen Forschungsarbeiten. Anhand eines Vergleichs mit einem Träger, der mit elastischem Silikon geklebt wurde, konnte gezeigt werden, dass die Steifigkeit des Klebstoffs nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit des ungebrochenen Verbundquerschnitts hat. Das Verformungsvermögen nach Auftreten des ersten Risses im Glas war dagegen sehr unterschiedlich.²⁷

An diese Untersuchungen knüpft die Arbeit von Kozłowski (2013) an. Der Fokus dieser Versuchsreihe lag auf dem Vergleich von drei Klebstoffen mit unterschiedlicher Steifigkeit sowie dem Einfluss von Floatglas und teilvorgespanntem Glas im Steg. Eine nahezu vollständige Verbundwirkung

²⁵ Das Baukastensystem wird bei Cruz (2008a–c) und Pequeno (2009) beschrieben.

²⁶ Vergleiche Cruz 2008b S. 442 ff.

²⁷ Vergleiche Blyberg 2011a, S. 512.

wird bereits bei einer Klebfuge mit mittlerer Steifigkeit erreicht. Die Tragfähigkeit konnte im Vergleich dazu mit einem sehr steifen Klebstoff nicht gesteigert werden. Die Träger mit elastischer Silikonklebung erreichten dagegen nur etwa 80 % der Traglast und wiesen nur 75 % der Steifigkeit auf. Aus den Ergebnissen geht weiterhin hervor, dass die Erstbruchlast durch die Verwendung von thermisch vorgespanntem Glas erwartungsgemäß gesteigert werden kann. Ein duktileres Tragverhalten, wie es Träger mit einem monolithischen Steg aus Floatglas aufwiesen, konnte nicht beobachtet werden.²⁸

Ein weiterer Vorschlag für einen Träger stammt von der Technischen Universität Wien.²⁹ Die Glasstege des kastenförmigen Trägerquerschnitts laufen nicht von Auflager zu Auflager durch, sondern sind in regelmäßigen Abständen unterbrochen. Das Prinzip basiert auf einem Vierendeelträger aus Holz, dessen Eckverbindungen nicht biegesteif ausgeführt werden. Die notwendige Aussteifung erhält das System durch die beidseitig umlaufend auf den Holzrahmen aufgeklebten Glasscheiben. Das Glas wird als Schubfeld beansprucht. Bei den Versuchen wird mit einer rein elastischen Klebung oder der Kombination mit einer druckfesten Klotzung experimentiert. Die Träger brechen entweder durch Zugversagen des Untergurts aus Furnierschichtholz oder durch Versagen von Eckverbindungswinkeln am Auflager. Zur Verbundwirkung lassen sich daher kaum neue Erkenntnisse gewinnen.

2.2.3 Wandscheiben und Schubfelder

Die Scheibentragwirkung von Glas lässt sich auch zur Aussteifung von Bauwerken nutzen. Aus der Arbeit von Hamm (1999, S. A.2-1 ff.) stammen erste Konstruktionsvorschläge zu Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise. Die Wandelemente bestehen aus einem schlanken Rahmen aus Furnierschichtholz, auf deren Außenseite eine Scheibe aus Floatglas aufgeklebt ist (Bild 9, Typ 1). Die Klebfuge wird umlaufend ausgeführt. Neben ausgewählten konstruktiven Details werden in der Arbeit Konzepte zur Bauteilberechnung und -dimensionierung vorgeschlagen.

²⁸ Vergleiche Kozłowski 2013, S. 262 ff.

²⁹ Vergleiche Hochhauser 2011a, S. 136 ff.

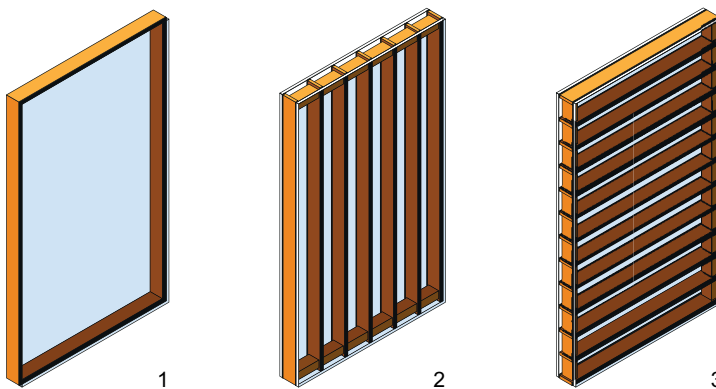


Bild 9
Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise. Prinzipdarstellung verschiedener Konstruktionstypen:

- 1 Schubfeld mit umlaufenden Holzrahmen, Verglasung einseitig
- 2 Schubfeld mit vertikalen Verstärkungsstreben, Verglasung beidseitig
- 3 Schubfeld mit horizontalen Verstärkungsstreben, Verglasung beidseitig

Niedermaier (2005) entwirft einen Hilfsrahmen aus Fichtenholz, der umlaufend auf die Glasscheibe geklebt wird. Haupttragstruktur und Verglasungselement werden dabei getrennt. Die Elemente können im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle mit der Tragstruktur auf herkömmliche Weise verschraubt werden. Dieses System ermöglicht auch einen späteren Austausch beschädigter Glaselemente.³⁰

Bemerkenswert sind die Ergebnisse aus den Resttragfähigkeitsuntersuchungen. Die Elemente wurden bei einem bestimmten Lastniveau durch einen Pendelschlag mit einem harten Stoßkörper beschädigt. Nach Weiterbelastung konnten die Elemente noch etwa 60 bis 70 % des Lastniveaus abtragen, das bei den unzerstörten Prüfkörpern erreicht wurde. Gleichzeitig traten größere Verformungen und ein duktileres Tragverhalten auf. Das Langzeitverhalten der verwendeten elastischen Klebstoffe unter permanenten Lasten bedarf aber weiterer Untersuchungen, da die Dauerstandsversuche keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern. Darüber hinaus wird in der Arbeit grundsätzlich die Verwendung von Verbund-Sicherheitsglas empfohlen.³¹

Das Konzept des Hilfsrahmens wird durch die Entwicklung einer gezahnten Koppelleiste am Forschungs- und Prüfinstitut Holzforschung Austria in Wien weiter verfeinert. Die Verzahnung ermöglicht kleinere Ansichtsflächen im Bereich der Pfosten und Riegel.³² Das macht das Produkt interessant für

³⁰ Vergleiche Niedermaier 2005, S. 126.

³¹ Vergleiche Niedermaier 2005, S. 141 f.

³² Vergleiche Edl 2008, S. 82.

hochwertige Architekturanwendungen. Das untersuchte Klebstoffspektrum umfasst elastische, semi-elastische und steife Klebstoffe. Die Versuchsergebnisse erlauben die Abgrenzung des Einsatzbereichs für die verschiedenen Klebstoffgruppen. Klebstoffe mit geringerer Steifigkeit sollten vorrangig für eingeschossige Tragwerke wie Wintergärten oder Pavillons eingesetzt werden. Größere Aussteifungslasten erfordern semi-elastische oder steife Klebstoffe.³³

Mehrere Forschungsprojekte an der Technischen Universität in Wien³⁴ griffen die vorgenannten Untersuchungen auf und konzentrierten sich auf die Optimierung der Aussteifungselemente in der Holz-Glas-Verbundbauweise. Darin werden weiterhin Klebstoffe mit unterschiedlichen Steifigkeiten untersucht. Dabei wird der Fokus auf elastische Silikonklebstoffe gerichtet, die durch ihre gute Beständigkeit gegenüber dem Einfluss von Schadmedien überzeugen.³⁵ Das Untersuchungsspektrum reicht von Kleinteilversuchen bis zu Bauteilversuchen an Prototypen im Originalmaßstab. Insbesondere werden auch bauphysikalische Fragestellungen erörtert. Die Erkenntnisse der Forschungstätigkeit münden in einem Versuchsbau und einem Pilotprojekt (Bild 2). Kleinere Bauwerke, wie beispielsweise Einfamilienhäuser, können durch Holz-Glas-Verbundelemente mit elastischer Klebverbindung ausgesteift werden (Bild 10).

Bild 10

Innovativer Holzbau mit Holz-Glas-Verbundfassade. Wohnhaus C/H1 in Haselbach (A). Die talseitigen Glasfassaden steifen die drei boxförmigen Gebäudeteile aus. Die Festverglasungen sind auf einen Adapterrahmen aufgeklebt, der mit der Unterkonstruktion verschraubt ist.

Foto: Franz Ebner



³³ Vergleiche Edl 2008, S. 176.

³⁴ Hochhauser 2011a und Neubauer 2011.

³⁵ Vergleiche Neubauer 2011, S. 223.

Die Ergebnisse der Forschungsprojekte zeigen dennoch, dass bei elastischen Klebverbindungen die Verformung der Klebfuge und die Kopfverschiebung des Verbundelements sehr groß und somit maßgebend werden. Die Holz- und Glasquerschnitte werden statisch nicht voll ausgenutzt. Einen weiteren Entwicklungsschritt markiert daher das Verklotzen der Glasscheibe, um die Tragfähigkeit der Verbundelemente zu erhöhen. Die Klotze werden zusätzlich zur kontinuierlichen Klebverbindung in den Eckbereichen der Verglasung angeordnet.³⁶

Ein Holz-Glas-Verbundpaneel, das sich von den bisher aufgezählten Varianten deutlich unterscheidet, wurde als Teil des bereits im Abschnitt 2.2.2 angesprochenen Baukastensystems entwickelt. Das Plattenelement soll für verschiedene Einbau- und Beanspruchungssituationen geeignet sein. Es besteht aus hölzernen Rippen, die entweder vertikal oder horizontal (Bild 9, Typ 2 und Typ 3) in der Wandscheibe angeordnet sind. Auf die Rippen wird beidseitig ein Verbund-Sicherheitsglas aus zwei Lagen Floatglas geklebt. Schubversuche in Bauteilgröße bestätigten ein duktileres Tragverhalten. Bei vertikaler Ausrichtung der Rippen konnten die größten Traglasten erzielt werden.³⁷

Ein weiterer Vorschlag für ein Fassadenelement, das aussteifend wirken soll, entstand an der Linnæus University in Växjö.³⁸ Die Verglasung des Holz-Glas-Verbundelements besteht hier aus drei Schichten. Innen befindet sich eine Mehrscheiben-Isolierverglasung, die dem Wärmeschutz dient. Als zweite Schicht folgt die aussteifende Verglasung. Außen befindet sich eine weitere Verglasung aus Verbundsicherheitsglas. Sie soll eine Beschädigung der Tragscheibe durch Vandalismus verhindern. Die tragende Verglasungsschicht wurde in Bauteilversuchen untersucht. Auf die Glas- kante einer monolithischen Verglasung wurden beidseitig Holzquerschnitte aufgeklebt. Elemente, die mit elastischem Silikonklebstoff geklebt wurden, versagten bei geringeren Lasten als Elemente, für die ein Acrylatklebstoff mit mittlerer Steifigkeit verwendet wurde. In ihrem Verformungsverhalten waren jedoch keine signifikanten Unterschiede erkennbar.

³⁶ Vergleiche Hochhauser 2011a, S.14.

³⁷ Vergleiche Pequeno 2009, S. 125 f.

³⁸ Vergleiche Blyberg 2011b, S. 15.

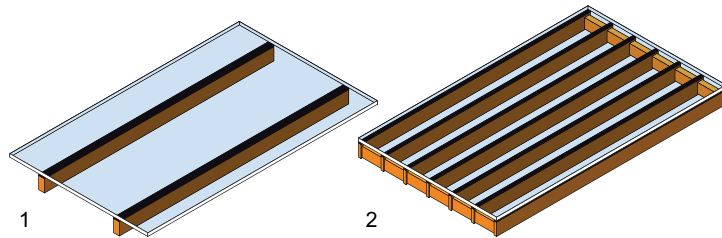
Alle Elemente versagten schlagartig durch Bruch der Verglasung.³⁹ Die Elemente wiesen aufgrund der Verwendung von monolithischem Glas keine Resttragfähigkeit auf.

2.2.4 Verbundplatten

Horizontale Verglasungen können durch Holzrippen versteift werden (Bild 11, Typ 1). Gleichzeitig lassen sich dadurch ein duktileres Tragverhalten und eine größere Resttragfähigkeit erzielen. In verschiedenen Arbeiten⁴⁰ wurde die Wirkungsweise solcher Verbundplatten untersucht und Bauteilversuche durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass auch bei diesem Konstruktionstyp das Glas zuerst bricht. Obwohl der Glasquerschnitt in der Druckzone angeordnet wird, stellten sich aufgrund des nachgiebigen Verbundes bei größeren Verformungen Zugspannungen an der unteren Glasoberfläche ein.

Bild 11
Holz-Glas-Verbundplatten.
Prinzipdarstellung verschiedener Konstruktionstypen:

- 1 Rippenplatte
- 2 Sandwichplatte mit beidseitiger Verglasung



Aus dem an der Universität in Minho entwickelten Baukastensystem resultiert auch eine Verbundplatte, die analog zu den Wandelementen aufgebaut ist. Der Glasquerschnitt liegt hier in der Zug- und der Druckzone des Sandwichaufbaus (Bild 11, Typ 2). Bauteilversuche an diesen Elementen zeigten, dass der erste Riss in der unteren Verglasungen schon bei einer Beanspruchung auftrat, die geringer war als die Traglast des alleinigen Holzquerschnitts. Die endgültige Bruchlast des Sandwichelements lag aber deutlich über diesem Wert.⁴¹ Daraus kann auf eine Mitwirkung des Glases in der Druckzone geschlossen werden. Die Verwendung von Glas in der Zugzone erscheint unter diesen Gesichtspunkten nur aus architektonischen Gründen sinnvoll.

³⁹ Vergleiche Blyberg 2011b, S. 16 ff.

⁴⁰ Hochhauser 2011a, S.172 ff und Hamm 1999, S. 38 ff.

⁴¹ Vergleiche Cruz 2008c, S. 454.

2.3 Tragendes Glas im Verbund

2.3.1 Relevanz für Holz-Glas-Verbundlösungen

Zahlreiche Entwicklungen im konstruktiven Glasbau basieren auf Werkstoffverbunden, die grundsätzlich einen effizienteren Materialeinsatz erlauben. Verbundkonstruktionen aus Holz und Glas sind nur ein Beispiel dafür, wie sich das Tragvermögen von Glas nutzen und das Materialverhalten grundlegend verbessern lässt. Gleichzeitig existiert ein breites Spektrum an Verbundlösungen mit anderen Materialien, die für eine Anwendung im Glasbau wissenschaftlich untersucht worden sind oder bereits eingesetzt werden. Häufig werden metallische Werkstoffe in Kombination mit Glas verwendet. Neben den Unterschieden in den Materialeigenschaften lassen sich einige Gemeinsamkeiten bei der Konstruktionsweise und dem Tragverhalten herausarbeiten. Die wichtigsten Entwicklungen werden daher nachfolgend kurz skizziert. Der Fokus richtet sich auf Materialkombinationen, die wie der Holz-Glas-Verbund auf die Verbesserung des Tragverhaltens von Glas abzielen.

In einer Zusammenstellung werden typische Verbundträgerquerschnitte und die Anwendung als tragende Wandscheibe gezeigt. Von Interesse sind Erkenntnisse zu geeigneten Glasarten- und aufbauten für Verbundelemente. Weiterhin steht die Ausbildung der Klebverbindung im Fokus. Die Mehrzahl der Glasverbunde wird durch Kleben gefügt. Obwohl die Dauerhaftigkeit des Verbundes maßgeblich von den Adhäsionskräften zur jeweiligen Substratoberfläche abhängt, sind auch weitere Materialkombinationen von Bedeutung. Es können beispielsweise geeignete Klebfugengeometrien von Metall-Glas- oder Kunststoff-Glas-Klebungen auf den Holz-Glas-Verbund übertragen werden.

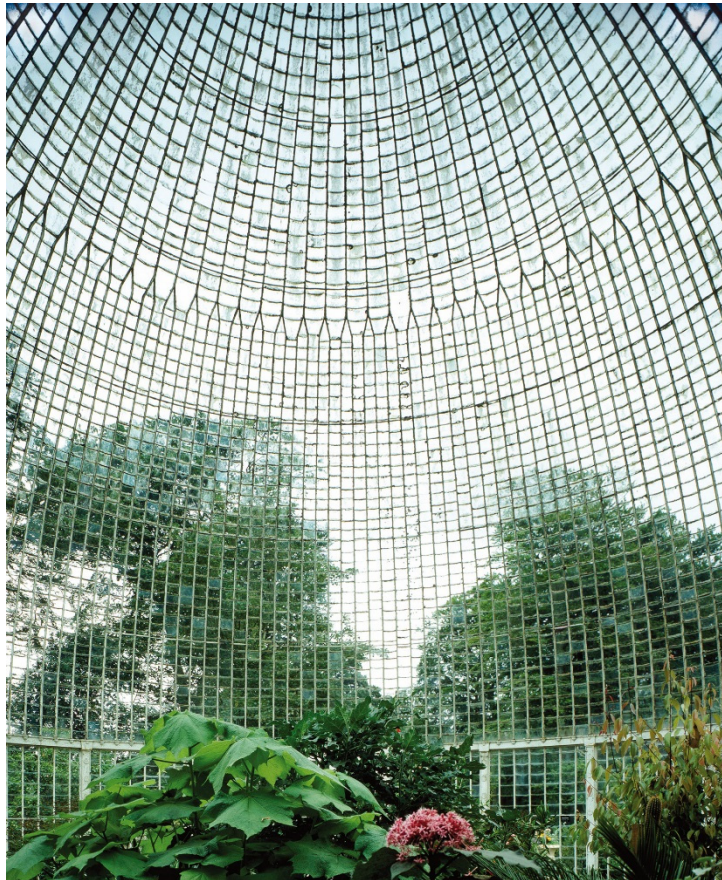
2.3.2 Historische Vorbilder

Schon die Pioniere des Glasbaus erkannten, dass sich schlanke Tragstrukturen mit dem transparenten Material nicht nur ausfachen sondern darüber hinaus auch aussteifen lassen. Die zum Teil sehr experimentellen Gewächshausbauten nach dem Loudonschen Prinzip sind ein weitbekanntes Beispiel dafür (Bild 12). Dabei waren statische Motive nicht unbedingt ausschlaggebend für die Entwicklung der schalenartigen Konstruktionen aus Eisen und Glas. Vielmehr folgte die Bauform der Forderung nach einem möglichst

Bild 12

Palmenhaus Bicton Gardens
in Budleigh Salterton (UK),
ein Gewächshaus nach dem
Loudonschen Bautypus⁴²

Foto: Stefan Koppelkamm



hohen Sonnenlichtertrag.⁴³ Das Tragskelett der Gewächshäuser besteht aus guss- oder schmiedeeisernen Sprossen, in das die Gläser mit Kitt umlaufend eingebettet sind. Die Verbundwirkung der Dichtmasse ermöglicht die Aussteifung der Konstruktion durch die Glashaut.

2.3.3 Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas

Die Anwendungsmöglichkeiten von monolithischem Glas als tragendes Bauteil sind wegen dessen Spröbruchverhaltens stark beschränkt. Daher bestehen Verglasungen mit erhöhten Anforderungen an Sicherheit und Tragfähigkeit häufig aus Verbundglas oder Verbund-Sicherheitsglas. Als Verbundglas wird ein Glasaufbau aus mindestens zwei Schei-

⁴² Vergleiche Koppelkamm 1988, S. 72 ff.

⁴³ Vergleiche Kohlmaier 1988, S. 210.

ben bezeichnet, der in der Fläche über eine Kunststoffzweischicht verbunden ist. Gemäß Definition weisen Verbund-Sicherheitsgläser einen ebensolchen Aufbau auf, müssen aber zusätzlichen Anforderungen in Bezug auf die Verletzungsgefahr und die Resttragfähigkeit nach einem Glasbruch genügen.⁴⁴ Gefährliche Glassplitter müssen an der Folie haften bleiben. Darüber hinaus dürfen keine größeren Öffnungen in der Folie entstehen. Der Kunststoff überbrückt dank einer ausreichenden Zugfestigkeit und einer großen Reißdehnung die Risse nach dem Glasbruch. Selbst wenn alle Glasschichten zerstört sind, bleibt der Glasaufbau als Paket erhalten. Das Glas trägt in der Druckzone auch im gebrochenen Zustand.

Solange sich die Rissverläufe in den einzelnen Schichten nicht überlagern, weist die Verglasung eine gute Resttragfähigkeit auf. Das Tragverhalten nach Bruch hängt maßgeblich vom Rissbild ab, das in erster Linie von der Glasart bestimmt wird. Weitere Faktoren sind die Einwirkungsart und die Bruchenergie. Eine gute Resttragfähigkeit wird erreicht, wenn grob brechende Glasarten wie teilvorgespanntes Glas oder Floatglas für Verbund-Sicherheitsgläser verwendet werden. Versagt dagegen Einscheibensicherheitsglas, zerfällt es in kleine, würfelförmige Bruchstücke. Ein Verbund-Sicherheitsglas aus voll vorgespanntem Glas hat deshalb nur ein niedriges Resttragvermögen.

Die gültigen technischen Regelwerke⁴⁵ schreiben die Verwendung von Verbund-Sicherheitsglas für Verglasungen mit erhöhten Sicherheitsanforderungen wie beispielsweise absturzsichernden Verglasungen und Horizontalverglasungen vor. Glasträger oder -schwerter sowie Verglasungen, die zur Aussteifung von Tragwerken herangezogen werden, sind derzeit noch nicht in einer Norm geregelt. An solche Bauteile bestehen sehr hohe Sicherheitsanforderungen, sodass aus Gründen der Redundanz und der Tragsicherheit in der Regel ein Verbundglasaufbau gewählt wird.

⁴⁴ Vergleiche DIN 1259-2 und DIN EN 12543-1.

⁴⁵ DIN 18008 (Glas im Bauwesen) wurde in den Jahren 2014 und 2015 bauaufsichtlich in den Bundesländern eingeführt. Die Teile 1 bis 5 dieser Norm lösen damit die bisher gültigen Technischen Regeln TRLV, TRAV und TRPV ab.

Eine gute Resttragfähigkeit lässt sich bei Verglasungen, die nicht nur ausfachend eingesetzt sondern in Scheibenebene mit mehr als ihrem Eigengewicht beansprucht werden, nicht allein durch Verbund-Sicherheitsglas erreichen. Versuche an Glasträgern haben gezeigt, dass die Resttragfähigkeit bei Verwendung von Polyvinyl-Butyral-Folie nach Bruch aller Glasschichten nur sehr gering ist.⁴⁶ Die Rissursprünge treten an den zugbeanspruchten Glaskanten nahezu deckungsgleich in allen Schichten auf. Wenn alle Glasscheiben des Querschnitts gebrochen sind, reißen die Zwischenschichten unter der hohen Zugbeanspruchung auf. Es bildet sich ein Gelenk aus und der Träger versagt. Glasträger werden daher für den baupraktischen Einsatz deutlich überdimensioniert.

2.3.4 Verbundträger

Glas-Verbundträger weisen eine deutlich verbesserte Resttragfähigkeit im Vergleich zu reinen Glasträgern auf. Die Glaskanten werden mit einem zugfesten Material wie beispielsweise Edelstahl verbunden (Bild 13), um bei Glasbruch ein duktileres Tragverhalten zu erzielen.

Bild 13

Demonstrator einer hybriden Fassadenkonstruktion. Auf die Glasschwerter wurden Stahllaschen aufgeklebt, um die Resttragfähigkeit zu verbessern und ein Fassadenprofil anzubringen.

Foto: Friedrich May



In den vergangenen Jahren wurden Glas-Verbundträger mit ganz unterschiedlichen Materialkombinationen entwickelt und wissenschaftlich untersucht. Die Auswahl reicht von Metallen über Holz oder faserverstärkte Kunststoffe bis hin zu bewehr-

⁴⁶ Vergleiche Härth 2013 S. 139 f., Weller 2010, S. 43. und Hess 2000, S. 62 f.

tem Beton. Mit dem Ziel allgemeingültige Aussagen abzuleiten, werden nachfolgend die relevanten Ergebnisse zu diesen Verbundträgern zusammengefasst.⁴⁷

Alle recherchierten Trägertypen (Bild 14) besitzen einen Steg aus Glas. Die Querschnittsform ist entweder ein schmales Rechteck mit dünnen Laschen an der oberen und unteren Glaskante oder ein zusammengesetztes I-Profil. Aus ästhetischen Gesichtspunkten wird vielfach ein großer Grad an Transparenz und somit ein hoher Glasanteil angestrebt. Weiterhin sind die verschiedenen Querschnittstypen dadurch gekennzeichnet, dass die zugfesten Materialien das Glas grundsätzlich nur an den neuralgischen Stellen entlang der Kanten verstärken.

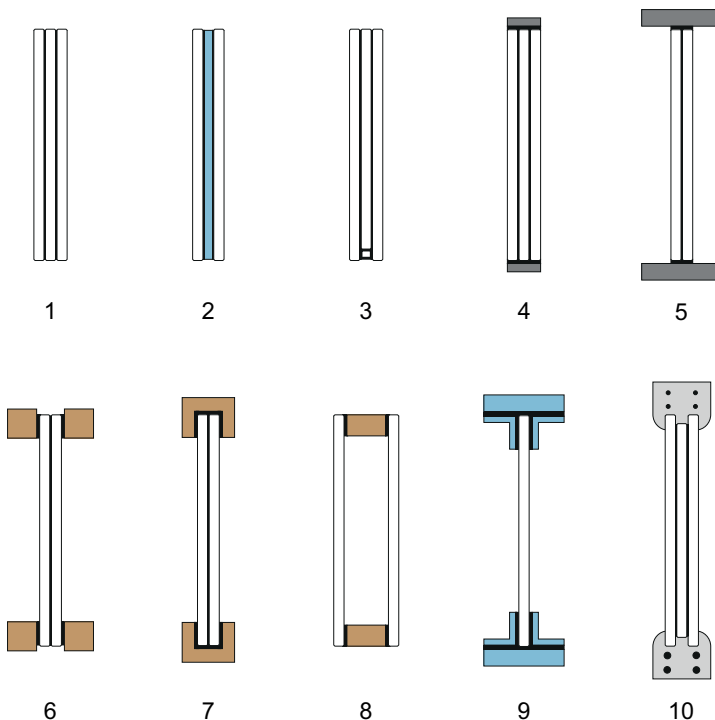


Bild 14
Vergleich verschiedener
Glas-Verbundträgerquer-
schnitte:

- 1 Verbund-Sicherheitsglas
- 2 Glas-PC-Glas-Hybrid (Härth 2013)
- 3 bewehrter Glasträger (Louter 2012)
- 4 Stahl-Glas (Weller 2010a)
- 5 Stahl-Glas mit ausgeprägten Flanschen (Abeln 2011)
- 6 Holz-Glas mit geteilten Flanschen (Hamm 1999, Kreher 2004a, Cruz 2008b)
- 7 Holz-Glas mit geschlitzten Flanschen (Blyberg 2011a)
- 8 Holz-Glas, Kastenquerschnitt (Cruz 2008b, Hochhauser 2011a)
- 9 GFK-Glas (Correia 2011)
- 10 hochfester Beton-Glas (Freytag 2004)

Zahlreiche Entwicklungen basieren auf Stahl als zusätzlichem Verbundmaterial. Die einzelnen Querschnittsteile werden über eine kontinuierliche Klebverbindung gefügt. Die

⁴⁷ Holz-Glas-Verbundträger wurden bereits unter Abschnitt 2.2.2 besprochen. Die Varianten sind zum Vergleich in Bild 14 erneut aufgeführt.

Fläche des Stahlquerschnitts und die Klebstoffsteifigkeit bestimmen maßgebend die mögliche Traglaststeigerung im Vergleich zu einem reinen Glasaufbau. Das Resttragvermögen ist häufig schon bei kleinem Stahlanteil ausreichend.

Bauteilversuche an der RWTH Aachen von Abeln (2011) haben gezeigt, dass sich die Traglast durch ausgeprägte Stahlflansche und die Verwendung von Klebstoffen mit hoher und mittlerer Steifigkeit deutlich steigern lässt. Am Bauteilprüfkörper, der mit einem elastischen Klebstoff verbunden war, konnte dagegen nur eine geringe Tragfähigkeitssteigerung gemessen werden.⁴⁸ Ein Stabilitätsversagen der Träger wurde durch Haltesysteme im Versuch unterbunden. Alle Versuchsträger versagten, als die Beanspruchbarkeit der zugbeanspruchten Kante des Glassteges überschritten wurde. Zur Resttragfähigkeit des Trägers, dessen Steg aus einem Verbund-Sicherheitsglas aus zweimal Einscheibensicherheitsglas besteht, wurden keine Aussagen getroffen.

Aber auch durch die Anordnung kleinerer und optisch dezentierter Querschnitte lässt sich das Tragverhalten schon entscheidend verbessern. Obwohl bei kleinem Stahlanteil die Traglast nicht signifikant steigt, ergeben sich deutliche Verbesserungen bei der Resttragfähigkeit. Dies zeigen die Vierpunkt-Biegeversuche an Trägern mit einlaminieren Hohlprofilen⁴⁹ oder aufgeklebten Flachstählen⁵⁰.

Ähnliche Ergebnisse wurden von Correia (2011) an Verbundträgern aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und Glas erzielt. Die Verbundträger bestanden aus einem Steg aus monolithischem Glas und Flanschen aus GFK. Die Studie umfasste zwei Querschnittsvarianten – eine mit großer Flanschquerschnittsfläche (Bild 14, Querschnitt 9) und eine zweite mit verhältnismäßig kleinem Querschnitt. Wie beim Stahl konnte mit einer steifen Klebverbindung und großen

⁴⁸ Die Bruchlast lag im Bauteilversuch für den Träger mit einer steifen Epoxidharzklebung etwa um das Vierfache über dem rechnerischen Wert für den reinen Glasaufbau. Mit einem weichen Polyurethanklebstoff, der eine gute Dehnfähigkeit aufwies, konnte die Tragfähigkeit im Kurzzeitversuch fast auf das Doppelte gesteigert werden. Die Tragfähigkeitssteigerung beim Versuchsträger mit Silikonklebstoff lag bei 30 %. (Vergleiche Abeln 2011, S. 222 f.)

⁴⁹ Vergleiche Louter 2012, S. 297.

⁵⁰ Vergleiche Weller 2010b, S. 43.

Flanschen die höchste Traglast erzielt werden. Nach Auftreten des ersten Risses im Glas ließ sich die Last bis zum endgültigen Versagen weiter steigern. Die so zusammengesetzten Verbundbauteile waren steifer als der reine Glasträger. Mit einem nachgiebigeren Polyurethanklebstoff konnte die Traglast dagegen nicht in gleichem Maße gesteigert werden. Dennoch wurde ein gutes bis sehr gutes Resttragvermögen nach Auftreten erster Risse im Glas beobachtet. Gleichzeitig zeigten die Träger mit nachgiebigem Verbund ein hohes Maß an Duktilität, bevor sie komplett versagten.⁵¹

Ein eher ungewöhnliches Beispiel ist die Verwendung von stahlbewehrten Flanschquerschnitten aus Hochleistungs-beton (Bild 14, Querschnitt 10). Die Besonderheit des Trägertyps liegt nicht nur in der Materialauswahl sondern auch in der schubfesten Verbindung. Die Verglasung wurde fixiert und direkt mit einbetoniert. Aufgrund der hohen Steifigkeit von Beton ist die schubfeste Verbindung im Vergleich zu herkömmlichen Klebschichten sehr steif. Ein Versagen der Verbindung wurde in Biegeversuchen nicht beobachtet. Der dreischichtige Verbundglassteg des Trägers bestand aus Einscheibensicherheitsglas. Die innere Schicht setzte sich in Spannrichtung aus drei Einzelteilen zusammen. Waren alle drei Glasschichten nahe der Auflagerbereiche gebrochen, versagte der Steg. Der Träger wies dann keine Resttragfähigkeit mehr auf. Nach dem Bruch aller Schichten des Glasaufbaus im mittleren Trägerabschnitt, konnte das Bauteil hingegen noch 75 % der Maximallast abtragen.⁵²

2.3.5 Wandscheiben aus Glas

Verglasungen können, in Scheibenebene beansprucht, auch im Aussteifungssystem eines Tragwerks zum Einsatz kommen. Das spröde Materialverhalten von Glas muss dabei besonders berücksichtigt werden. Die Einleitung der Lasten in die Glasscheibe stellt eine weitere Herausforderung bei der Entwicklung solcher transparenten Tragsysteme dar.

Die verschiedenen Systeme zur Lasteinleitung lassen sich zwei grundlegenden Prinzipien zuordnen. Zum einen können die Kräfte in diskreten Punkten – beispielsweise durch eine

⁵¹ Vergleiche Correia 2011, S. 2303 ff.

⁵² Vergleiche Freytag 2004, S. 113.

Klotzung in den Ecken der Scheibe – übertragen werden. Zum anderen lassen sich die Kräfte auch kontinuierlich entlang der Scheibenkanten einleiten. In diesem Zusammenhang wird nur die letztgenannte Variante den Verbundsystemen zugeordnet, da für die umlaufende Kraftübertragung in der Regel eine Klebverbindung notwendig ist.

Die Druckkräfte in Scheibenebene können insbesondere bei schlankem Querschnitt zu einem Stabilitätsversagen der Verglasung führen. Bei Anwendungen in der Fassade sind die Glaskanten häufig allseitig gelagert, sodass es unter einer Druck- oder Schubbeanspruchung beziehungsweise unter einer Kombination aus beiden Beanspruchungsarten zum Beulen der Verglasung kommen kann. Der Einfluss der Randglieder ist bei den scheibenartigen Bauteilen unterhalb der kritischen Beulspannung gering. Ihre Funktion besteht darin, die Lasten sicher in die Scheibe einzuleiten. Die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Verbundmaterialien muss dann zur Wirkung kommen, wenn die Verzweigungslast überschritten wird und gegebenenfalls überkritische Tragreserven genutzt werden sollen.

Zahlreiche Arbeiten⁵³ widmen sich dem Beulverhalten von in der Scheibenebene beanspruchten Verglasungen. Eine aussagekräftige Übersicht zu den betrachteten Systemen und Randbedingungen wurde in einem Bericht von Taskgroup 12 der COST Action TU0905⁵⁴ veröffentlicht. Die Klassifikation erfolgt zuerst nach der Beanspruchungsart. Es wird nach Druckbeanspruchung aus Vertikallast und Schubbeanspruchung aus Horizontallast unterschieden. Weitere Kriterien sind die Lagerungsart und die Lasteinleitung.⁵⁵ Von Interesse für die in dieser Arbeit betrachteten Holz-Glas-Verbundkonstruktionen⁵⁶ sind die Untersuchungen, die sich auf

⁵³ Bedon 2013, Wellershoff 2008, Huveners 2007, Luible 2004 u. a.

⁵⁴ Die COST-Initiative fördert die Zusammenarbeit im Bereich der wissenschaftlichen und technischen Forschung auf europäischer Ebene, wobei nationale Forschungsvorhaben aus verschiedenen Partnerländern koordiniert werden. Action TU0905 beschäftigt sich mit dem konstruktiven Glasbau und tragenden Verglasungen. Taskgroup 12 (TG12) war für das Themengebiet Stabilität von Verglasungen verantwortlich.

⁵⁵ Vergleiche Bedon 2014, S. 666.

⁵⁶ Diese Arbeit widmet sich Holz-Glas-Verbundsystemen, bei denen der Lastabtrag ausschließlich über die Klebung erfolgt.

liniengelagerte Systeme mit kontinuierlicher Lasteinleitung beziehen. Geklotzte Systeme werden nicht weiter betrachtet. In diversen experimentellen Untersuchungen zur Stabilität von Verglasungen konnte ein überkritisches Tragverhalten der Scheiben beobachtet werden. Luible (2004) untersucht beispielsweise allseitig gelagerte Verglasungen unter einaxialer Druckbeanspruchung. Wellershof (2008) beschäftigt sich mit umlaufend randverklebten Verglasungen unter Schubkraft. In beiden Fällen wird teilvorgespanntes Glas als monolithische Scheibe und als Verbund-Sicherheitsglasscheibe verwendet. Aufgrund des schlankeren Aufbaus konnten mit monolithischem Glas prozentual größere Tragreserven mobilisiert werden. Bei dem typischerweise grob brechenden teilvorgespanntem Glas entstand aufgrund der hohen Energiefreisetzung ein sehr feines Bruchbild.⁵⁷ Dennoch blieben die Bruchverläufe erkennbar und die für die Beanspruchung typische Beulfigur kann abgelesen werden.

In einer weiteren Studie von Huveners (2009) werden monolithische Floatgläser unter Schubbeanspruchung untersucht. Der Versuchsaufbau besteht aus einem an den Eckpunkten gelenkig verbundenen Stahlrahmen, der durch quadratische Verglasungen ausgesteift wird. Die Versuchsergebnisse offenbaren deutliche Unterschiede im Trag- und Verformungsverhalten zwischen den Prüfkörpern mit unterschiedlicher Klebfugeengeometrie und -steifigkeit. Die stirnseitig mit einem elastischen Polyurethanklebstoff geklebten Prüfkörper (Bild 15, Variante 1) verformten sich sehr stark. Eine wesentlich höhere Steifigkeit wiesen die Prüfkörper auf, bei denen ein Epoxidharzklebstoff verwendet wurde und die Klebung auf den Glasoberflächen seitlich der Glaskante (Bild 15, Varianten 2 und 3) ausgeführt worden war. Dennoch konnte in allen Fällen nach Auftreten des ersten Risses die Last weiter gesteigert werden, sodass sich damit das endgültige Versagen ankündigte.⁵⁸

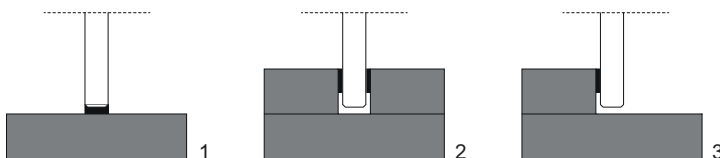


Bild 15
Gestaltung der Klebfuge
nach Huveners 2007, S. 362.
1 Glaskante
2 Glasfläche, beidseitig
3 Glasfläche, einseitig

⁵⁷ Vergleiche Wellershoff 2008, S. 13 und Luible 2004, S. 180.

⁵⁸ Vergleiche Huveners 2009, S. 43 ff. und 2007, S. 43 ff.

Die ersten Risse wirkten sich allerdings kaum auf die Steifigkeit der Prüfkörper aus. Ein duktiler Verformungsverhalten war nicht erkennbar. Die Verglasungen, deren Rand mit einer steifen Klebung zum Rahmen verbunden waren, versagten durch Überbeanspruchung auf Zug. Die Risse verliefen senkrecht zur Zugdiagonalen. Die Bruchbilder deuten an, dass die Scheibe nicht aus Stabilitätsgründen versagt hat.

Eine umfangreiche Parameterstudie zur Interaktion von Schubbeanspruchung und einaxialer Druckbeanspruchung wurde von Bedon (2013) durchgeführt. Anhand numerischer Berechnungen wurden Einflüsse auf das Tragverhalten wie geometrische Imperfektion, Glasart, Schlankheitsgrad und Lastverhältnis näher untersucht.

2.4 Konstruktionsprinzipien von tragenden Wand- und Fassadenelementen aus Holz und Glas

2.4.1 Aufbau

Ein Holz-Glas-Verbundelement, das als Teil einer Wand oder Fassade verwendet werden kann, besteht aus drei wesentlichen Komponenten: einer Verglasung, einer Unterkonstruktion aus Holz und einer lastabtragenden Klebung, die beide Komponenten verbindet. Diese Klebverbindung wird bei Wandelementen umlaufend ausgeführt. Bild 1 zeigt diesen Prinzipaufbau.

Grundlegende Forschungsarbeiten und Entwicklungen zu tragenden Wandelementen in Holz-Glas-Verbundbauweise wurden im Abschnitt 2.2.3 vorgestellt. Nachfolgend werden nun ausgewählte konstruktive Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Detail erläutert. Bei einer Vielzahl der Elemente handelt es sich um Bauteilprüfkörper, an denen ausschließlich die Tragfunktion untersucht wurde. Ästhetische und funktionale Anforderungen an die Wand- oder die Fassadenelemente bleiben dabei unberücksichtigt und müssen einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden.

2.4.2 Verglasung

Aussteifende Verglasungen werden vorzugsweise eben ausgeführt. Vorkrümmungen wirken sich nachteilig auf das Tragverhalten von Schubfeldern aus, da die Vorverformung einen wesentlichen Einfluss auf das Beulverhalten hat. Im

Allgemeinen werden grob brechende Glasarten wie Floatglas oder teilvorgespanntes Glas verwendet. Aus den recherchierten Forschungsarbeiten lassen sich zwei grundlegende Varianten in Bezug auf die Lage der Verglasung im Rahmen herausarbeiten. Einerseits kann die Tragscheibe symmetrisch zur Systemachse beziehungsweise in der Rahmenebene angeordnet werden (Bild 16, Varianten 1 bis 3). Das bietet den Vorteil, dass bei der Lastweiterleitung über das Holz-Glas-Verbundelement keine Biegemomente infolge planmäßiger Exzentrizität auftreten. Nachteilig wirkt sich dabei jedoch die exponierte Lage von Holz und Klebfuge aus. Die außen liegenden Komponenten des Elements sind der Witterung ungeschützt ausgesetzt.

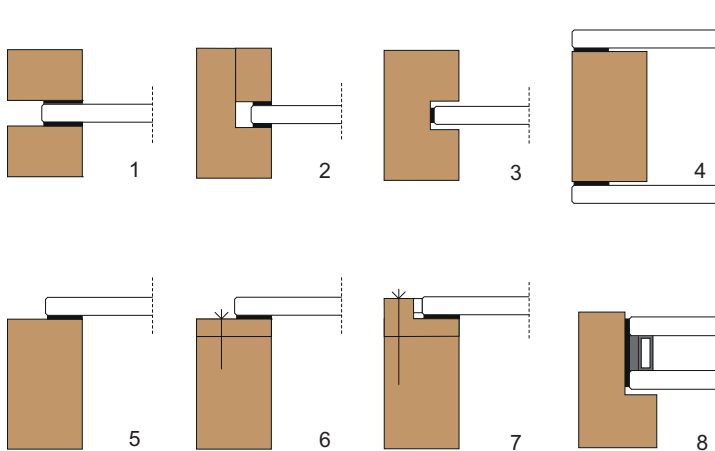


Bild 16

Prinzipdarstellung verschiedener Verbindungsdetails zwischen Verglasungen und Holzrahmen:

- 1 Klebfuge beidseitig, geteiltes Profil (Blyberg 2011b)
- 2 Klebfuge beidseitig, Vollprofil (Endzustand nach Montage) (Ber 2014)
- 3 Klebfuge stirnseitig Vollprofil (Ber 2014)
- 4 Klebfuge einseitig, zwei Scheiben (Ber 2014)
- 5 Klebfuge einseitig
- 6 Klebfuge einseitig auf flacher Randleiste (Niedermaier 2005 und Edl 2008)
- 7 Klebfuge einseitig mit zusätzlicher Klotzung auf L-förmiger Randleiste (Hochhauser 2013)
- 8 Klebfuge stirnseitig (auf Glas und Randverbund) (Ber 2014)

Andererseits kann die Verglasung auch auf der Außenseite des Holzrahmens angebracht werden, wodurch die Klebfuge und das Holz besser vor direkter Bewitterung geschützt sind. In diesem Fall befindet sich die Klebfuge rückseitig auf der Tragscheibe (Bild 16, Varianten 5 und 6). Die Kräfte in der Wandebene erzeugen eine zusätzliche Biegebeanspruchung in der Verglasung. Die Gefahr eines Stabilitätsversagens ist daher im Vergleich zu den symmetrischen Querschnitten größer. Andere Konstruktionen wiederum wurden mit dem Ziel entwickelt, stirnseitig Kräfte über die Kante in

die Verglasung einzuleiten (Bild 16, Varianten 7 und 8). Die Verglasung befindet sich hier auch an der Außenseite des Querschnitts. Die Glaskante muss jedoch – beispielsweise durch Ausklinken des Rahmens – umfasst werden, um Druckkräfte an das Nachbarelement weiterzugeben.

Ein Sonderfall ist die beidseitige Anordnung der Verglasungen analog zu einer Beplankung bei Holztafelelementen (Bild 16, Variante 4). Das Gesamtelement wird mittig beansprucht, die Lasteinleitung in die Verglasung erfolgt jedoch weiterhin außermittig. Offen bleibt bei dieser Konstruktionsweise allerdings die Frage nach der Dichtigkeit der Kavität zwischen den beiden Verglasungen. Dringt Feuchtigkeit in den Zwischenraum ein, kann sich bei ungünstigem Temperaturverhältnis Tauwasser auf der Glasoberfläche niederschlagen. Verschmutzungen durch kleine Partikel müssen ebenso verhindert werden. Eine Lösungsmöglichkeit wäre die permanente Zuführung von Trockenluft.⁵⁹

2.4.3 Ausbildung der Klebfuge

Aus den zuvor beschriebenen Varianten zur Einbaulage der Verglasungen ergeben sich zwei prinzipielle Klebfugegeometrien. Entweder wird stirnseitig auf die Glaskante oder rückseitig auf der Glasoberfläche geklebt (Bild 16). Bei der Mehrheit der Wandelemente liegt die Klebfuge auf der Glasoberfläche. Die Verglasung kann dabei einseitig oder beidseitig mit dem Holzprofil verklebt sein. Bei den einseitigen Varianten ist eine ungünstigere Spannungsverteilung in der Klebfuge zu erwarten. Bei einer Belastung der Verglasung in der Scheibenebene wird die Klebung nicht nur auf Schub sondern aufgrund der zusätzlichen Biegung aus der außermittigen Lasteinleitung auch auf Zug beziehungsweise Spaltung beansprucht. Darüber hinaus erfährt das Holz eine Belastung senkrecht zur Faser. In allen Varianten differieren Breite und Dicke der Klebschicht, da diese entsprechend der Verarbeitungsanforderungen und der Leistungsfähigkeit des Klebstoffs gewählt wurden. Steife Klebstoffe erfordern zu meist dünnere Fugendicken als elastische Klebstoffe.

⁵⁹ Dieser Vorschlag greift auf das Prinzip der Closed-Cavity-Fassade zurück. Das sind Doppelfassaden, bei denen der Zwischenraum zwischen Innen- und Außenhaut verschlossen ist. Dieser Zwischenraum wird kontinuierlich und kontrolliert mit trockener und gereinigter Luft gespült. (Vergleiche Gartner 2014.)

Ein Adapterrahmen (Bild 16, Varianten 6 und 7), der häufig auch als Koppel- oder Randleiste bezeichnet und auf der Baustelle in Einheit mit der Verglasung auf die Unterkonstruktion geschraubt wird, beeinflusst die Geometrie der Klebfuge nicht wesentlich. Diese Systeme sind nachgiebiger, da es eine zusätzliche Schnittstelle gibt, an der Verformungen auftreten können. Im Rahmen von Forschungsarbeiten an der Technischen Universität Wien wurde das Klebfugendetail um eine Klotzung der Scheibenkante erweitert. Das Tragverhalten soll sich durch die Kombination aus steifen Klotzen in den Ecken des Wandelements und einer umlaufenden elastischen Klebung gegenüber der jeweiligen Einzellösung verbessern.⁶⁰ Die Klebfugegeometrie und die Anschlussdetails werden jedoch deutlich komplexer.

Bei Ber (2014) wurde die Verglasung in einen profilierten Rahmen eingesetzt, wobei direkt auf den Randverbund und die Glaskanten der Isolierglaseinheit geklebt wurde (Bild 16, Variante 8). In diesem Fall fehlen jedoch Aussagen zur Verträglichkeit des Klebstoffs mit den Dichtstoffen und zur grundsätzlichen Dichtigkeit des Randverbundes bei einer derartigen Beanspruchung.

2.4.4 Marktreife Systeme mit Koppelleiste

Die Idee der umlaufend aufgeklebten Koppelleiste⁶¹ wurde in zwei Varianten bereits umgesetzt: einer gezahnten Koppelleiste aus Birkensperrholz (Bild 17, links) und einer überlappenden Koppelleiste aus glasfaserverstärktem Kunststoff (Bild 17, rechts). Beide Systeme werden im Werk auf die Rückseite der Isolierverglasung geklebt. Auf der Baustelle werden die vorgefertigten Elemente dann nur noch mit der Fassadenunterkonstruktion aus Holz verschraubt.

Die Firma UNIGLAS bietet eine Elementfassade an, die neben den senkrecht auf die Außenhüllen wirkenden Windlasten auch Aussteifungslasten in der Verglasungsebene abtragen kann.⁶² Für die Verbindung der Furniersperrholzleiste

⁶⁰ Vergleiche Hochhauser 2013, S. 189 f.

⁶¹ Vergleiche Edl 2008, S. 108 und Niedermaier 2005, S. 58.

⁶² Unter bestimmten Voraussetzungen kann die Holz-Glas-Verbundfassade bei kleineren Gebäuden mit bis zu zwei Geschossen die Windaussteifung übernehmen. (Vergleiche UNIGLAS 2014, S. 19.)

aus Birke mit der Verglasung wird ein elastischer Silikonklebstoff verwendet, der speziell für diese Anwendung entwickelt wurde. Das Birkenfurniersperrholz wird bis auf die Kleboberfläche mit Dickschichtlasur beschichtet, um das Holz später vor eindringender Feuchtigkeit zu schützen. Vor dem Kleben wird die Leiste rückseitig auf der Verglasung durch ein Distanzklebeband aus offenzelligem PE-Schaum fixiert. Die Koppelleisten sind mit einer Verzahnung versehen und werden versetzt angebracht (Bild 18). Die Leisten greifen daher an den Verbindungsstellen zum Nachelement direkt ineinander. Die Schraubenachse verläuft in der Mittelachse der Tragprofile, die dann nur eine geringe Ansichtsbreite aufweisen müssen. Einzelne Elemente lassen sich bei Beschädigung problemlos austauschen.⁶³

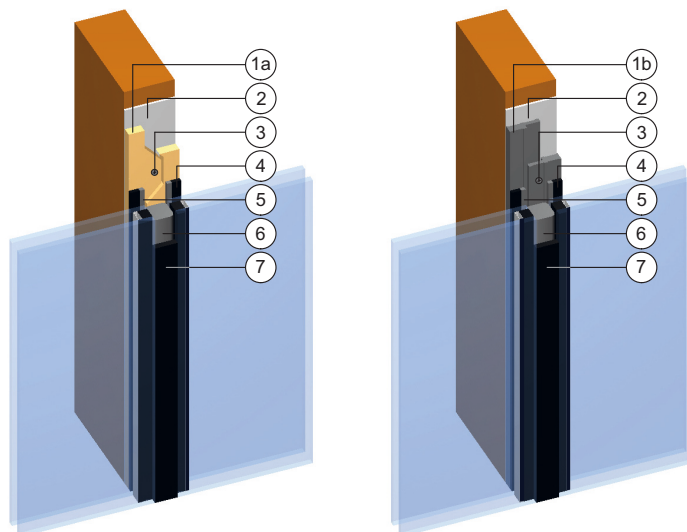
Bild 17

Marktreife Holz-Glas-Verbundsysteme.

Links: UNIGLAS | FACADE.

Rechts: Fasco®-Fassadensystem.

- 1a Koppelleiste aus Birken-sperrholz
- 1b Koppelleiste aus GFK
- 2 Dichtungsband
- 3 Holzbauschraube
- 4 Klebfuge (2K-Silikon)
- 5 Distanzklebeband
- 6 Rundschnur (PE-Schaum)
- 7 Nassversiegelung mit kompatibellem Dichtstoff



Das vorgefertigte System kann in Deutschland derzeit nur mit einer Zustimmung im Einzelfall angewendet werden.⁶⁴ Es gelten die Anforderungen für Structural-Sealant-Glazing-Systeme (SSG). Das Eigengewicht der Verglasung muss über spezielle Klotze oder Konsolen abgetragen werden. Ab

⁶³ Vergleiche UNIGLAS 2014, S. 28.

⁶⁴ Eine Anwendung als Structural-Sealant-Glazing-Fassade ist in Deutschland auch mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) möglich. Der Hersteller dieser Holz-Glas-Verbundfassade hat eine solche Zulassung beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) beantragt. (Vergleiche UNIGLAS 2014, S. 6.)

einer Höhe von 8 m werden zusätzlich mechanische Sicherungen erforderlich, die ein Herabfallen der Verglasung verhindern, falls die Klebfuge versagen sollte.



Bild 18

Koppelleiste mit Verzahnung. Holz-Glas-Verbundelemente vor der Montage auf der Baustelle.

Foto: OTTO CHEMIE

Die Firma Knapp vertreibt eine alternative Koppelleiste aus glasfaserverstärktem Kunststoff⁶⁵ (GFK). Die Klebfugenausbildung ähnelt dem System von UNIGLAS (Bild 17). Im Vergleich zum Sperrholz hat glasfaserverstärkter Kunststoff unter Temperatur- und Feuchtigkeitseinfluss ein nahezu identisches Ausdehnungsverhalten wie Glas. Die Zwangsbeanspruchung infolge unterschiedlicher Längenänderungen zwischen Glas und Leiste sind gering. Zudem ist die Beständigkeit des Kunststoffs gegenüber Feuchtigkeit sehr gut.⁶⁶ Nachteilig wirken sich dagegen die Lochleibungsverbindung⁶⁷ und die Überlappung der Leisten an der Schnittstelle zwischen zwei Verglasungselementen aus. Häufig müssen mehrere Elemente demontiert werden, um eine beschädigte Verglasung ersetzen zu können.

⁶⁵ Formal handelt es sich bei einer Klebung auf GFK nicht mehr um einen Holz-Glas-Verbund. Die GFK-Leiste wurde jedoch auf Basis verschiedener Forschungsvorhaben zu diesem Themengebiet entwickelt und vorzugsweise für die Verbindung mit einer Unterkonstruktion aus Holz konzipiert. Das System wird daher an dieser Stelle zur Zusammenfassung des Stands der Technik dokumentiert. Als Fügepartner wird GFK allerdings im Rahmen der Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

⁶⁶ Vergleiche Fasco 2013, S. 2.

⁶⁷ Die Festigkeit von Lochleibungsverbindungen in GFK ist wegen der gerichteten Faseranordnung und mangels Fähigkeit des Materials zu plastifizieren gering. (Vergleiche Engelsmann 2010, S. 87.)

In Deutschland bestehen vergleichbare baurechtliche Restriktionen in Bezug auf die Anwendung der lastabtragend geklebten Verglasung mit dem Fasco®-Profil wie für das System von UNIGLAS. Der Anwendbarkeitsnachweis der Bauart muss über eine Zustimmung im Einzelfall erbracht werden.

2.4.5 Identifizieren geeigneter Tragsysteme

Wandartige Holz-Glas-Verbundelemente empfehlen sich besonders für die Verwendung in vorgefertigten Holzbauweisen, da die Prozesskette wesentliche Bearbeitungsschritte im Werk vorsieht. Die Herstellung der Klebverbindung erfordert kontrollierte Umgebungsbedingungen. Die Fertigung im Werk ist oft die einzige Möglichkeit eine Klebung, die lastabtragend sein soll, fachgerecht auszuführen. Auf der Baustelle sollte nur in besonderen Fällen und unter Einhaltung hoher Qualitätsstandards geklebt werden.

Der Holzbau weist eine lange Tradition auf. In der Vergangenheit war der Holzbau im Wesentlichen durch handwerkliche Arbeitsweisen geprägt. Mittlerweile haben sich jedoch moderne Bauweisen etabliert, die einen hohen Grad an industrieller Vorfertigung ermöglichen. Zusätzlich befördert durch die hohe Nachfrage nach nachhaltigen Gebäuden, hat der Holzbau in letzter Zeit zahlreiche Innovationen im Bauwesen hervorgebracht. Eindrucksvoll zeigen das beispielsweise vorgefertigte Wandelemente, mit denen Gebäude im Bestand in kurzer Zeit energetisch saniert werden können.⁶⁸

Auf die Vorfertigung und technische Aspekte bezogene Klassifizierungen von verschiedenen Holzbauweisen finden sich beispielsweise bei Kolb (1995) und bei Albers (2001). Sortiert nach dem Vorverfertigungsgrad – von niedrig bis sehr hoch – lassen sich die Tragsysteme im Holzbau wie folgt klassifizieren:

- Blockbau
- Fachwerkbau
- Ständer- und Rahmenbau
- Skelettbau
- Tafel- und Raumzellenbau⁶⁹

⁶⁸ Vergleiche beispielsweise TES EnergyFaçade (TES 2014).

⁶⁹ Vergleiche Kolb 1995, S.34.

Aufgrund ihrer Tragstruktur und des hohen Vorfertigungsanteils lassen sich Holz-Glas-Verbundelemente besonders gut in Skelettbauten oder große Wandtafeln integrieren. Im Skelettbau könnte auf diagonale Windverbände und Aussteifungssysteme teilweise bis ganz verzichtet werden, wenn die Außenhülle aus tragenden Holz-Glas-Verbundelementen besteht (Bild 19). Holz-Tafelemente ließen sich mit großen transparenten Flächen kombinieren. In den transparenten Wandbereichen würden anstatt der Beplankung Holz-Glas-Verbundelemente die Tragfunktion übernehmen (Bild 20).

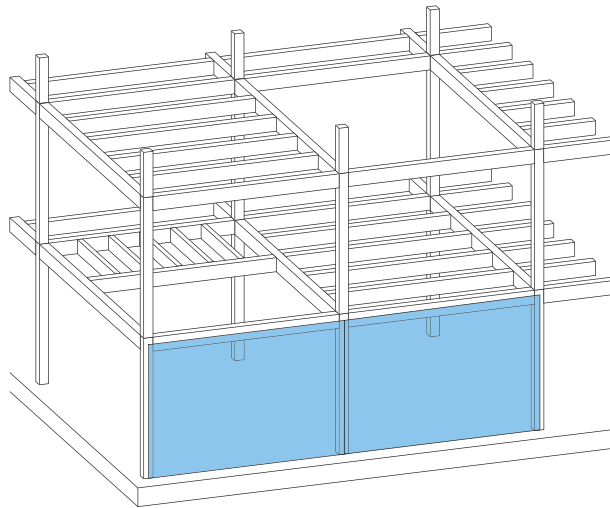
2.4.6 Skelett-, Tafel- und Massivholzbauweise

Stützen und Träger, die in einem vorgegeben Raster angeordnet werden, bilden die Primärkonstruktion von Skelettbauten. Die Sekundärstruktur, bestehend aus Balken und Sparren, baut auf dieser Primärstruktur auf. Vorgefertigte Tafелеlemente, Leichtbaukonstruktionen oder verglaste Einheiten erzeugen die Gebäudehülle. Einzelne Tragwerksbestandteile können bereits im Werk abgebunden werden. Auf der Baustelle wird der Montageaufwand durch moderne Verbindungsmittel deutlich reduziert.

Die Holztafelbauweise zeichnet sich durch einen noch höheren Grad an Vorfertigung aus. Im Werk werden nicht nur einzelnen Komponenten sondern ganze Wandmodule vormontiert. Ihre Fertigung ist damit weitestgehend unabhängig von den Witterungsbedingungen auf der Baustelle. Hinzu kommen Vorteile in Bezug auf die vorzuhaltende Platzkapazität und die Logistik auf der Baustelle. Ein Tafелеlement besteht aus einem Stabgerüst – den Rippen und Schwellen, das mit Holzplatten, Holzwerkstoffen oder Gipswerkstoffen beplankt wird. Die Rippen werden in einem bestimmten Raster angeordnet und durch eine Kopf- und Fußschwelle zusammengehalten. Die Beplankung wird entweder nur auf einer oder auf beiden Seiten mit Nägeln, Klammern oder Schrauben befestigt. Diese Platten erfüllen neben dem Raumabschluß auch eine statische Funktion. Das System aus Rippen und Beplankung kann als Wandscheibe das Tragwerk aussteifen. Außerdem sichert die Beplankung die schlanken Rippen gegen Kippen oder Knicken, was deren Stabilität unter Druck beziehungsweise Biegung erhöht.

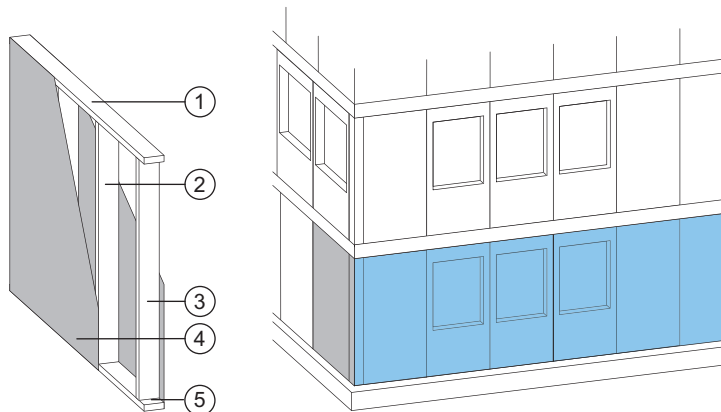
Bild 19

Holzskelettbau mit Primär- und Sekundärstruktur nach Kolb (1995, S. 28). In der Gebäudehülle angeordnete Holz-Glas-Verbundelemente (blaue Fläche) können zur Aussteifung des Gebäudes beitragen.

**Bild 20**

Prinzipaufbau einer Holztafel (graue Fläche) und Holztafelbau aus Kleintafeln nach (Kolb 1995, S. 15). In der Außenwand können Wandtafeln durch Holz-Glas-Verbundelemente (blaue Fläche) substituiert werden.

- 1 Kopfschwelle
- 2 Mittelrippe
- 3 Randrippe
- 4 Beplankung
- 5 Fußschwelle



Neben der Tragstruktur beinhalten die Wandtafeln auch die erforderlichen Dämmmaterialien, Wasserdampf- und Feuchtebarrieren sowie Fenster- und Türelemente. Darüber hinaus können Medien und Haustechnik vorinstalliert werden. Die Elemente werden bedarfsorientiert auf die Baustelle geliefert und zeitnah montiert (Bild 21).

Großformatige Wandelemente können auch in Massivholzbauweise ausgeführt werden. Bei dieser relativ jungen Holzbautechnologie werden massive Platten aus kreuzweise unter Pressdruck verleimtem Fichtenholz verwendet. Mithilfe von CNC-gesteuerten Säge- und Fräsanlagen werden daraus die fertigen Elemente abgebunden. Massivholzplatten können sowohl als tragende, aussteifende aber auch als

nichttragende Elemente eingesetzt werden.⁷⁰ Die Tragsysteme und die Montageanforderungen ähneln denen der Tafelbauweise. Holz-Glas-Verbundelemente bieten hier ein vergleichbares Potenzial zur Tragwerksintegration.



Bild 21

Transport und Montage einer Holz-Wandtafel. Baustelle des Aktiv-Stadthauses der städtischen Wohnungsbau-Holding ABG in Frankfurt am Main. Der Neubau eines achtgeschossigen Wohngebäudes im Effizienzhaus Plus-Standard mit etwa 150 m Länge und 10 m Breite erhält eine Gebäudehülle in Holzbauweise. Das Tragwerk besteht aus Stahlbeton.

Foto: Gump & Maier GmbH

2.5 Zusammenfassung wesentlicher Erkenntnisse

Die wesentlichen Entwicklungen zum Holz-Glas-Verbund beziehen sich auf tragende Wandscheiben und Verbundträger. Eine symmetrische Ausführung der Elemente bietet statische Vorteile, eine außen liegende Verglasung mit einseitiger Klebung ist dagegen aus konstruktiven und funktionalen Gesichtspunkten zu bevorzugen.

Die Materialeigenschaften des Klebstoffs beeinflussen das Tragverhalten des Verbundelements signifikant. Klebstoffe mit großer Reißdehnung und geringer Steifigkeit ergeben einen sehr nachgiebigen Verbund. Große Verformungen sind die Folge. Glas und Holz beziehungsweise andere geeignete Verbundmaterialien werden nur wenig ausgelastet. Elastische Silikonklebungen haben den Vorteil, dass langjährige Erfahrungen in der Fassadenanwendung vorliegen. Die Dauerhaftigkeit und Alterungsbeständigkeit ist hervorragend. In Bezug auf den Holz-Glas-Verbund erreichen Silikon jedoch ihre Leistungsgrenze bei Anwendungen, die ein hohes Tragvermögen und gleichzeitig geringe Verformungen

⁷⁰ Vergleiche KLH 2013, S. 4.

erfordern. Die Grenze markieren etwa Aussteifungssysteme für Gebäude mit mehr als zwei Geschossen.

Steife bis mittelsteife Klebstoffe rücken daher immer wieder in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen zum Holz-Glas-Verbund. Je höher die Steifigkeit der Verbindung, umso größer ist die Mitwirkung der am Rand angeordneten Querschnitte. Allerdings kann sich die Traglast zuungunsten der Resttragfähigkeit erhöhen. Gute Verbundwerte werden schon bei mittleren Steifigkeiten erreicht. Für die Klebstoffgruppen liegen jedoch nur wenige Langzeiterfahrungen vor.

In den ausgewerteten Studien wurden sowohl monolithische Gläser als auch Verbund-Sicherheitsgläser untersucht. In den meisten Fällen ist die Verwendung von Verbund-Sicherheitsglas erforderlich, um eine Resttragfähigkeit des Verbundelements zu erzielen. Verbundträger mit einem Steg aus monolithischem Floatglas erreichten zwar auch ein gutes Resttragvermögen, offen bleibt jedoch, inwieweit sich dieses Verhalten auch bei größeren Spannweiten und Trägerhöhen nachweisen lässt. Eine sichere Splitterbindung ist ebenso nur bei Verwendung von laminierten Glasprodukten gegeben. Ein zweischichtiger Glasaufbau mit einer Zwischenschicht aus Polyvinyl-Butyral oder einem vergleichbaren Material wird daher für die baupraktische Anwendung der Holz-Glas-Verbundbauweise favorisiert.

Durch die Verwendung von thermisch vorgespannten Glasarten steigen die Bruchlasten der Verbundelemente analog zur charakteristischen Beanspruchbarkeit der jeweiligen Glasart. Gleichzeitig sinkt häufig die Resttragfähigkeit des Elements in Relation zur Traglast, da das Bruchbild immer feingliedriger wird. Versagt die Verglasung bei aussteifenden oder druckbeanspruchten Wandscheiben, entsteht auch bei typischerweise grob brechenden Glasarten ein kleinteiliges Bruchbild. Durch überkritische Tragreserven und die damit einhergehenden sichtbaren Beulverformungen weisen die Elemente ein bilineares Verformungsverhalten auf.

3 Klebverbindungen im Glasbau

3.1 Fügen von Glas

3.1.1 Besondere Merkmale des Fügeworkstoffs

Glas übt eine besondere Faszination aus. Das transparente aber spröde Material suggeriert eine gewisse Leichtigkeit und Zerbrechlichkeit. Gleichzeitig sollen Bauwerke robust⁷¹ konstruiert sein und mannigfaltigen Einwirkungen widerstehen. Ein Gegensatz, der die Planer von tragenden Glaskonstruktionen vor große Herausforderungen stellt, aber auch dazu anspornt, das Material weiter auszureizen (Bild 22).



Bild 22

Begehbare Glasboden. Aussichtsplattform des Calgary Tower in Kanada. Die Besucher müssen Schwindelfreiheit beweisen, um die Glasscheibe zu betreten und ohne Angst etwa 160 m in die Tiefe zu blicken. Mit einem Scheibenpaket aus mindestens drei Glasschichten, die mit Folien laminiert sind, erreichen begehbare Verglasung das gleiche Sicherheitsniveau wie vergleichbare Bauteile aus anderen Werkstoffen.

Gläser für das Bauwesen bestehen überwiegend aus Kalk-Natronsilicatglas. Das Basisglas enthält etwa 70 % Siliciumdioxid (SiO_2).⁷² Weitere Bestandteile werden hinzugefügt, um die Schmelztemperatur bei der Herstellung herabzusetzen, die Läuterung der Schmelze zu erleichtern oder die chemische Beständigkeit zu verbessern. Flachgläser für Bauanwendungen werden heute nahezu ausschließlich im Floatglasverfahren hergestellt. Die Grundbestandteile werden bei großer Hitze aufgeschmolzen und kontinuierlich auf ein flüssiges Zinnbad geleitet. Durch das Aufschwimmen und die Selbstnivellierung der Glasschmelze entstehen sehr

⁷¹ Der Begriff Robustheit wird in der Fachliteratur recht unterschiedlich definiert. Aus Ingenieurssicht treffend beschreibt Harte Robustheit als „... diejenige Eigenschaft, die es Tragwerken ermöglicht, einer unvorhergesehenen oder außergewöhnlichen Aktion verhaltenszieltgerecht zu widerstehen.“ (Harte 2007, S. 228.)

⁷² Vergleiche DIN EN 527-1:2012-11, 5.1.

ebene Glasoberflächen. In einem langen Kühlkanal wird das erstarrte Glasband dann auf Rollen weitertransportiert und am Ende auf übliche Transportmaße⁷³ zugeschnitten. Glasveredelungsbetriebe verarbeiten das Flachglas weiter zu Bauprodukten wie Verbund-Sicherheitsglas (VSG), Mehrscheiben-Isolierglas oder thermisch vorgespanntes Glas.

Aus den Bindungskräften des Materialgefüges ergibt sich eine sehr hohe, bei Flachgläsern aber nur theoretisch verfügbare Festigkeit. Real reduzieren Mikrorisse oder andere mikroskopisch kleine Beschädigungen an der Oberfläche die Beanspruchbarkeit des Glases drastisch.⁷⁴ Wird die Oberfläche auf Zug beansprucht, weiten sich diese Risse auf. Am Rissgrund entsteht eine kritische Spannungsspitze, die nicht durch plastische Verformungen abgebaut werden kann und letztendlich den Bruch initiiert. Die geringe Biegezugfestigkeit von normal gekühltem Floatglas lässt sich aber durch thermisches Vorspannen wieder erhöhen. Im Glasquerschnitt wird dabei ein Eigenspannungszustand erzeugt, bei dem Druckspannungen an den Oberflächen mit Zugspannungen im Kern im Gleichgewicht stehen. Die Mikrorisse werden dadurch überdrückt. Einscheibensicherheitsglas (ESG) und teilvorgespanntes Glas (TVG) sind thermisch vorgespannte Gläser, die im Bauwesen verwendet werden. Ihre Glaszusammensetzung bleibt unverändert, sodass sich die grundlegenden Materialkenngrößen (Tafel 1) nicht ändern.⁷⁵

Tafel 1

Materialeigenschaften für ausgewählte Glasarten.⁷⁶ Charakteristische Biegezugfestigkeit (f_k), Elastizitätsmodul (E), Querdehnzahl (μ), thermischer Längenausdehnungskoeffizient (α_T), Dichte (ρ) und Temperaturwechselbeständigkeit (TWB).

Glasart	f_k [N/mm ²]	E [N/mm ²]	μ	α_T [1/K]	ρ [kg/m ³]	TWB [K]
Kalk-Natronsilicatglas (Floatglas)	45	70.000	0,2	$9,0 \cdot 10^{-6}$	2.500	40
TVG/ESG aus Floatglas	70/ 120	70.000	0,2	$9,0 \cdot 10^{-6}$	2.500	100/ 200
Borosilicatglas (Flachglas)	45	60.000 bis 70.000	0,2	$3,1 \cdot 10^{-6}$ bis $6,0 \cdot 10^{-6}$	2.200 bis 2.500	80

⁷³ Die Regelabmessungen von Floatglas betragen 3,21 x 6,00 m. Floatglas ist in abgestuften Dicken von 2 bis 25 mm verfügbar. (Vergleiche DIN EN 527-2:2012-11, 3.2 und Tab. 1.)

⁷⁴ Vergleiche Petzold 1990, S. 35 f.

⁷⁵ Vergleiche Wagner 2002, S. 14.

⁷⁶ Nach Produktnormen DIN EN 527-1, DIN EN 1863-1, DIN EN 12150-1 und DIN EN 1748-1-1.

Glas ist ein sehr widerstandfähiges Material mit großer Oberflächenhärte. Allerdings verhält es sich ideal linear elastisch und weist kein plastisches Verformungsvermögen auf. Die Bruchdehngrenze liegt bei etwa 0,1 %. Bei Überbeanspruchung versagt es durch ein plötzliches Aufbrechen des Materialgefüges.⁷⁷ Dieses spröde Materialverhalten ist bei der Verwendung als Baustoff ein entscheidender Nachteil, da sich ein drohendes Materialversagen nicht durch erkennbare Verformungen ankündigt. Neben notwendigerweise hohen Materialsicherheitsbeiwerten ergeben sich daraus für Glasanwendungen im Bauwesen bestimmte Konstruktionsvorgaben, die auf eine zwangsarme Lagerung, einen planmäßigen Toleranzausgleich und das Vermeiden von Kontakt mit härteren Materialien abzielen. Darüber hinaus muss für zahlreiche Konstruktionen und Einbausituationen die Resttragfähigkeit der Verglasung nachgewiesen werden.⁷⁸

Gerade bei spröden Materialien fällt der Wahl der richtigen Verbindungsmittel und einer geeigneten Verbindungstechnik eine zentrale Bedeutung zu. Glas reagiert wegen seiner Sprödigkeit auf eine konzentrierte Einleitung von Lasten besonders empfindlich. An Kontaktstellen zwischen zwei Gläsern oder zwischen dem Glas und der Unterkonstruktion müssen daher Klotzungen aus Kunststoff oder andere geeignete Kontaktmaterialien für eine homogene Lasteinleitung sorgen. Außerdem bedingen bestimmte Verbindungsmittel, wie beispielsweise Tellerhalter, eine Aussparung oder eine Bohrung in der Verglasung. An diesen Unstetigkeitsstellen entstehen bei Biege- oder Membranbeanspruchung der dünnen Glasplatten Spannungsspitzen, die sich mit den Beanspruchungen aus lokaler Lasteinleitung überlagern und in Summe die Dimensionierung der Verglasung maßgeblich bestimmen. Das Kleben stellt in dieser Hinsicht ein besonders materialgerechtes Fügeverfahren für Glas dar. Der Glasquerschnitt wird an der Verbindungstelle nicht durchdrungen und daher in seinen Eigenschaften nicht beeinflusst. Insbesondere mit linienförmigen und flächigen Klebungen lassen sich Lasten homogen in das Glas einleiten.

⁷⁷ Vergleiche Petzold 1990, S. 35.

⁷⁸ Vergleiche DIN 18008-1:2010-12, 4.1.2, 4.1.3 und 10.

3.1.2 Wirkprinzip und Fügeverfahren

Tragende Verbindungen sind neuralgische Punkte in Baukonstruktionen. An diesen Stellen werden Kräfte weitergeleitet und umgelenkt, unterschiedliche Werkstoffe kombiniert, Steifigkeiten und Freiheitsgrade definiert sowie Toleranzen ausgeglichen. Darüber hinaus können zusätzliche Funktionen wie beispielsweise das Dichten notwendig sein. Die Wahl der richtigen Verbindungsmittel und einer geeigneten Verbindungstechnik entscheidet daher maßgeblich über die Qualität und Dauerhaftigkeit der Konstruktion. Im Sinne eines systematischen Konstruierens lassen sich Verbindungen nach verschiedenen Ordnungsmerkmalen klassifizieren. Zu den Hauptordnungskriterien zählen der Werkstoff, das Wirkprinzip und das Fertigungsverfahren.⁷⁹

Durch das Kleben können insbesondere unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden werden. Eine rein werkstoffspezifische Betrachtung eignet sich daher nicht, um Klebverbindungen im Glasbau exakt einzuordnen. Methodisch besser erfassen lassen sich Klebverbindungen durch eine Kategorisierung nach dem Wirkprinzip oder nach dem Fertigungsverfahren. Kraftschluss, Formschluss und Stoffschluss sind die physikalischen Wirkprinzipien, auf denen Verbindungen basieren. Kleben zählt wie auch das Schweißen und das Löten zu den stoffschlüssigen Verbindungen. Bei stoffschlüssigen Verbindungen basiert der Zusammenhalt auf atomaren beziehungsweise molekularen Bindungskräften.⁸⁰ Beim Kleben entsteht die Verbindung durch ein Zusatzmaterial – den Klebstoff, der physikalische und chemische Bindungen zu den Füge teiloberflächen ausbilden

⁷⁹ Vergleiche Moro 2009, S. 38 ff.

⁸⁰ Klebungen den stoffschlüssigen Verbindungen zuzuordnen, entspricht der allgemein üblichen Definition in der Literatur (Vergleiche Habenicht 2012, S. 1, Brockmann 2005, S. 1, Roth 1996, S. 6. u. a.). Der stoffliche Zusammenhalt beruht sowohl auf chemischen als auch auf physikalischen Bindungskräften und begründet Gemeinsamkeiten bei der Verbindungsgeometrie und Füge teilbeanspruchung. Aus Sicht des Autors ist diese Zuordnung des Klebens zum Stoffschluss sehr anschaulich und eignet sich besonders in Bezug auf Anwendungen im Bauwesen. Vereinzelt existiert jedoch eine abweichende Betrachtungsweise, die zwischen molekularen Bindungskräften bei gleichen und unterschiedlichen Werkstoffen differenziert. Klebungen werden dort als adhäsionsschlüssige Verbindungen gesondert abgegrenzt und dem Wirkprinzip Kraftschluss zugeordnet, da kein reines Stoffkontinuum entsteht. (Vergleiche Moro 2009, S. 50 ff.)

kann. Diese Haftkräfte zwischen Klebstoff und Füge teiloberfläche werden als Adhäsion bezeichnet. Daneben bestimmt der innere Zusammenhalt des Klebstoffs beziehungsweise der Fügeworkstoffe – die Kohäsion – die Festigkeit der Klebverbindung.

Das Fertigungsverfahren bildet die Grundlage für einen weiteren Klassifizierungsansatz. Kleben zählt zum Fertigungsverfahren Fügen. In Abhängigkeit vom Abbindeprozess unterscheidet das Ordnungssystem weiterführend in die Untergruppen Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen und Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen.⁸¹ Der Schwerpunkt liegt hier auf der Herstellung der Verbindung. Funktionale Aspekte aus der eigentlichen Nutzungsphase spielen eine untergeordnete Rolle.⁸² Die zugehörige Norm (DIN 8593-0, Tab. 2) charakterisiert zusätzlich die Art des Zusammenhalts und die Lösbarkeit der unterschiedlichen Fügeverfahren. Klebverbindungen lassen sich abgesehen von wenigen Ausnahmen, wie beispielsweise speziellen Haftklebungen, nicht zerstörungsfrei lösen. Insbesondere bei Klebungen, die hohe Lasten übertragen sollen, werden beim Lösen die Füge teile beschädigt oder zerstört.

3.1.3 Vor- und Nachteile von Klebverbindungen

Das Wirkprinzip und die Herstellung bestimmen die wesentlichen Merkmale der unterschiedlichen Fügeverfahren. In der Fachliteratur werden die Vor- und Nachteile von Klebverbindungen ausführlich beschrieben.⁸³ Bei der Detailentwicklung von Baukonstruktionen muss nun zusätzlich die Charakteristik der zu fügenden Materialien berücksichtigt werden, um den geeigneten Verbindungstyp auszuwählen. Nachfolgend werden daher die wesentlichen Vor- und Nachteile des Klebens mit Bezug zum Fügematerial Glas diskutiert.

Der entscheidende Vorteil des Klebens für Anwendungen im Glasbau gegenüber konventionellen Fügeverfahren wie dem Schrauben oder Klemmen liegt in der materialschonenden Lastübertragung. In Lastrichtung ergibt sich beispielsweise bei einschnittigen Klebungen mit großer Überlappungslänge

⁸¹ Vergleiche DIN 8580, 5.7 und DIN 8593-8, 6.

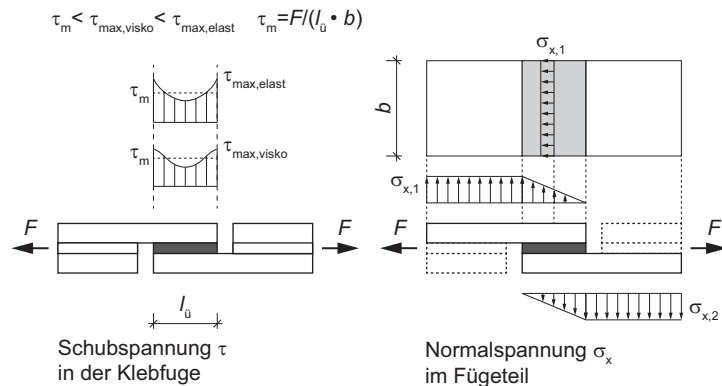
⁸² Vergleiche Moro 2009, S. 40.

⁸³ Vergleiche u. a. Habenicht 2006, S. 355 ff. und S. 359 ff.

eine relativ gleichmäßige Schubspannungsverteilung. Lediglich an den Enden der Klebfuge können wegen der Fügeteildehnungen Spannungsspitzen auftreten. Quer zur Lasttrichtung ist die Spannung sogar gleichmäßig im Fügeteil verteilt (Bild 23), da das Materialgefüge der Substrate beim Kleben nicht beeinflusst wird und keine Aussparungen oder Bohrungen notwendig sind. Klebstoffe weisen zudem vielfach ein viskoelastisches Materialverhalten und eine größere Nachgiebigkeit als die Fügeworkstoffe auf. Dies vermindert zusätzlich die Spannungsspitzen. Das Kleben erfüllt somit eine zentrale Forderung beim Konstruieren mit spröden Materialien wie Glas: lokale Spannungskonzentrationen sollen reduziert oder ganz vermieden werden.

Bild 23

Spannungsverteilung in der Klebschicht und im Fügeteil bei einer einschnittig überlappten Klebverbindung mit zentrischer Lasteinleitung nach Habenicht (2006, S. 415 und S. 417). An den Rändern der Klebschicht entstehen Spannungsspitzen τ_{\max} . Bei einem viskoelastischen Materialverhalten des Klebstoffs fallen die Spannungsspitzen geringer aus als bei elastischem Materialverhalten aus.



Kleben ist außerdem bei ganz unterschiedlichen Werkstoffkombinationen anwendbar. Eine Vielzahl von Anwendungen im Glasbau, wie beispielsweise Vorhangfassaden, in denen eine gesonderte Unterkonstruktion aus Metall, Holz oder auch Kunststoff die Verglasungen aufnimmt, erfordert die Verbindung von Glas mit anderen Materialien. Aber auch Ganzglaskonstruktionen können von der Klebtechnik profitieren. Mit transparenten Klebstoffen lassen sich zum Beispiel Primärtragstrukturen aus Glas herstellen, die ganz ohne optisch störende mechanische Zusatzelemente auskommen (Bild 24). Ein weiterer Vorzug für das Fügen von Glas: Beim Kleben tritt keine beziehungsweise nur eine sehr geringe Temperaturbeanspruchung der Fügeteile auf. Im Vergleich zum Schweißen wird beim Kleben das Materialgefüge nicht durch Wärme beeinflusst. Kalk-Natronsilicatgläser weisen nur eine geringe Temperaturwechselbeständigkeit auf. Eine lokale Erwärmung von Flachgläsern beim Schweißen würde zu Zwangsspannungen führen, die einen thermischen Bruch initiieren können.



Bild 24

Designstudie auf der glasstec 2010 in Düsseldorf. Tragende Glasrahmen mit transparenter Klebverbindung im Überschneidungsbereich der Einzelelemente an der Ecke. Die Verbindung erinnert an eine Schlitz- und Zapfenverbindung. Bei der Stütze laufen die jeweils äußeren, bei den Rahmenriegeln die beiden inneren Schichten des vierlagigen Glasaufbaus bis in die Ecke durch.

Foto: Stefan Unnewehr

Auch die dichtende Wirkung des Klebstoffs lässt sich ausnutzen. Der Klebstoff füllt die Fuge vollständig aus und bildet mit den Fügeteilen ein Materialkontinuum. Bei linienförmigen Klebungen ergibt sich so eine zusätzliche Dichtfunktion, die beispielsweise Vorteile für geklebte Verglasungen in der Gebäudehülle bringt. Auch der Randverbund von Mehrscheiben-Isoliergläsern wird geklebt. Die Verbindung hält die Einzelscheiben des Verglasungsaufbaus zusammen und dient als Sekundärdichtung für das im Scheibenzwischenraum eingeschlossene Gasvolumen.

Offenkundig stehen diesen Vorteilen aber auch Nachteile gegenüber. Zeitabhängige Alterungsprozesse führen über die Lebensdauer der Klebverbindung zu einer Verminderung der Beanspruchbarkeit im Vergleich zu den Ursprungswerten. Klebverbindungen im Glasbau sind über eine rein mechanische Beanspruchung hinaus verschiedenen Umwelteinwirkungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Strahlung oder korrosiven Medien ausgesetzt. Sie können die Polymerstruktur des Klebstoffs und die Haftkräfte zu den Fügeteiloberflächen negativ beeinflussen. Im Gebäudeinneren ist eine geklebte Verglasung vor direkter Bewitterung geschützt. Die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit schwanken nur mäßig und bewegen sich jahreszeitlich auf einem relativ einheitlichen Niveau. Das Hauptanwendungsgebiet für Verglasungen liegt allerdings in der Gebäudehülle. Klebverbindungen für Verglasungen liegen daher typischerweise genau an dieser hochgradig beanspruchten Schnittstelle zwischen Innen- und Außenraum. Zusätzliche Vorkehrungen zum

Schutz der Klebfuge und die Notwendigkeit komplizierter Lebensdauervorhersagen stellen einen Nachteil gegenüber anderen Fügeverfahren dar.

Einen ähnlichen Stellenwert nimmt das zeit- und temperaturabhängige Materialverhalten der meisten Klebstoffe ein. Im Vergleich zu klassischen Konstruktionsmaterialien im Bauwesen wie Beton, Stahl oder Holz verhalten sich Klebstoffe viskoelastisch. Die Materialantwort auf eine Belastung setzt sich aus einem elastischen, reversiblen Verformungsanteil und einem viskosen, irreversiblen Verformungsanteil zusammen, der zeitverzögert auftritt. Die Beanspruchbarkeit und Verformung einer Klebverbindung hängen daher von der Lasteinwirkungsdauer und der Belastungsgeschwindigkeit ab. Aufgrund der Polymerstruktur beeinflusst die Temperatur die Nachgiebigkeit vieler Klebstoffe gerade im baupraktisch relevanten Temperaturbereich. Das bedingt eine wesentlich aufwendigere Kennwertermittlung zur Materialbeschreibung und erhöht die Komplexität bei der Berechnung und Bemessung geklebter Verbindungen.

Auch die Herstellung ist aufwendiger. Der Klebprozess erfordert zusätzliche Arbeitsschritte, etwa die unbedingt notwendige Reinigung der Oberflächen und gegebenenfalls eine weitere Vorbehandlung der Füge Teile. Außerdem bestehen Restriktionen im zeitlichen Ablauf. Reaktionsklebstoffe binden nach dem Zusammenfügen ab. Die Füge Teile müssen fixiert bleiben, bis das Polymer ausreichend vernetzt ist und eine Mindestfestigkeit aufweist. Die volle Belastung darf erst nach dem Erreichen der Endfestigkeit aufgebracht werden. Die Hersteller von geklebten Verglasungen müssen daher die entsprechenden Flächen und Lagerkapazitäten für großflächige Bauteile vorhalten. Hinzu kommt der Aufwand für die Überwachung und Kontrolle der Klebarbeiten, damit eine ausreichende Qualität bei der Ausführung sichergestellt werden kann. Eine Werksfertigung ist die Regel, da der Klebstoff sensitiv auf eine Oberflächenkontamination der Füge Teile reagiert. Klebungen werden daher nur in Einzelfällen auf der Baustelle ausgeführt.

Klebverbindungen erschweren die Wiederverwertung der gefügten Materialien. Glasabfälle können zwar grundsätzlich

erneut eingeschmolzen werden. Das Glas muss dafür jedoch von fremden Stoffen befreit werden.⁸⁴ Klebstoffreste lassen sich derzeit nur mit eher aufwendigen Aufbereitungsverfahren wieder von der Glasoberfläche entfernen.

3.1.4 Glasoberfläche

Bei Klebverbindungen sorgen chemische und physikalische Wechselwirkungen zwischen dem Klebstoff und der Füge-
teilerfläche für den Zusammenhalt. Der Aufbau von diesen Adhäsionskräften hängt entscheidend von der Zusammensetzung der Glasoberfläche ab, die sich vom Glasgefüge im Kern unterscheidet.

Bereits im Herstellungs- und Formgebungsprozess von Flachgläsern ändert sich unter der Schutzgasatmosphäre und beim Kontakt mit dem flüssigen Zinn oberflächennah die Zusammensetzung des Glases. Die beiden Oberflächen von Floatgläsern sind daher unterschiedlich beschaffen. In der Floatkammer lagert sich an der Unterseite des Glases, die als Badseite bezeichnet wird, Zinnoxid (SnO_2) in der Oberfläche ein.⁸⁵ Auf der gegenüberliegenden Atmosphärenseite verdampfen dagegen alkalische Bestandteile, sodass hier der Natriumgehalt sinkt. Beim langsamen Abkühlprozess des Glasbands, das bei etwa 600 °C zu erstarren beginnt, ändert sich die Zusammensetzung der Oberfläche weiter. Im Kühlkanal reagieren die Glasbestandteile mit der Luftfeuchtigkeit aus der Umgebungsluft. An beiden Oberflächen bilden sich hochreaktive Hydroxyl(OH)-Gruppen aus.⁸⁶ Diese Schicht ist hydrophil und adsorbiert Wasser aus der umgebenden Atmosphäre, das als Teil der Grenzschicht zwischen Glas und Klebstoff den Aufbau von Adhäsionskräften erschwert. Der Wasserfilm führt außerdem zur Auslaugung der Glasoberfläche.

⁸⁴ Bei der Wiederverwertung bestehen Einschränkungen. Glasabfälle aus Rückbaumaßnahmen werden derzeit nicht oder nur begrenzt der Flachglasproduktion wieder zugeführt. Verunreinigungen, unbekannte Glasbestandteile und Beschichtungsmaterialien aus dem aufbereiteten Glasbruch könnten die Zusammensetzung der Schmelze beeinträchtigen. Der Glasbruch wird daher bei anderen Glasprodukten wiederverwendet, die eine geringere Reinheit der Glaszusammensetzung erfordern. (Vergleiche WECOBIS 2015.)

⁸⁵ Vergleiche Schaeffer 1993, S. II/17 f.

⁸⁶ Vergleiche Gläser 1999, S. 33 f.

Hinzu kommen organische Verschmutzungen, die sich beim Transport und der Weiterverarbeitung auf der Glasoberfläche absetzen. Verschmutzungen lassen sich gut durch geeignete Reinigungsverfahren wieder entfernen. Der Wasserfilm bildet sich jedoch nach einer technischen Trocknung durch den Wassergehalt in der Atmosphäre schnell wieder neu und kann daher für praktische Anwendungen nicht dauerhaft entfernt werden. Eine Untersuchung zur Auswirkung einer Vorkonditionierung der Glasoberfläche auf die Haftfestigkeit bestätigt zudem, dass eine Trocknung des Glases vor dem Kleben nicht zu einer deutlichen Verbesserung der Haftfestigkeit im Vergleich zur Vorkonditionierung unter Normalklima führt.⁸⁷ Von größerer Bedeutung ist die Fähigkeit der verwendeten Klebstoffe, die angelagerte Wasserschicht zu überwinden, um Bindungen zur hydroxilierten Oberfläche aufzubauen.

Zum Einfluss der Bad- und Atmosphärenseite auf die Haftfestigkeit sind verschiedene Studien aus der Literatur bekannt.⁸⁸ Die dargestellten Ergebnisse lassen keine einheitliche Aussage zu. Zwar bestehen häufig Unterschiede im Haftverhalten zwischen der Bad- und Atmosphärenseite, es kann jedoch keiner der beiden Seiten ein grundsätzlich positiver oder negativer Einfluss zugeschrieben werden. Für typische Anwendungen im Glasbau erscheint die Vorgabe einer bestimmten Oberfläche zum Kleben ohnehin nicht praktikabel, da die Verglasungen zuvor zahlreiche Verarbeitungsschritte durchlaufen und damit eine bestimmte Oberfläche zum Kleben nur mit größerem Aufwand garantiert werden

⁸⁷ Vergleiche Kleinert 2011.

⁸⁸ Druckscherversuche an kleinen Glas-Glas-Prüfkörpern, die mit einem handelsüblichen Epoxidharzklebstoff verbunden waren, zeigten nach vier Wochen Wasserlagerung keine signifikanten Unterschiede bei den Haftfestigkeiten zwischen den beiden Glasoberflächen. Ähnliche Untersuchungen an Klebungen mit einkomponentigem Polyurethan deuten allerdings auf bessere Dauerhaftigkeit der Verbindung auf der Atmosphärenseite hin. Glas-Metall-Klebungen mit strahlungshärtenden Acrylaten wiesen in Zugversuchen ebenso höhere Haftfestigkeiten an der Atmosphärenseite auf. In der gleichen Studie lagen die Werte allerdings nach einem Freibewitterungsversuch für beide Seiten auf einem einheitlichen Niveau. Bei einem Acrylschaumklebeband wurden auf der Badseite höhere Schälwiderstände gemessen. (Vergleiche Tasche 2007, S. 117 f., Qu 2000, S. 75 f. und Lotz 1995, S. 123 ff.)

kann.⁸⁹ Dennoch sollte bei experimentellen Untersuchungen von Haftungseigenschaften der Einfluss der Glasseite individuell für jeden Klebstoff bewertet werden. Bei vergleichenden Versuchen empfiehlt es sich, diesen Einfluss zu eliminieren, indem eine der beiden Glasseiten für das Kleben festgelegt wird. Insbesondere bei kleinen Klebflächen, wie sie bei Versuchen im Labormaßstab auftreten, sollte die Atmosphärenseite bevorzugt werden, da Zinn nicht homogen in die Glasoberfläche auf der Badseite diffundiert. Ein uneinheitlicher Zinngehalt könnte die Resultate verfälschen.

3.2 Typische Anwendungsbeispiele im Glasbau

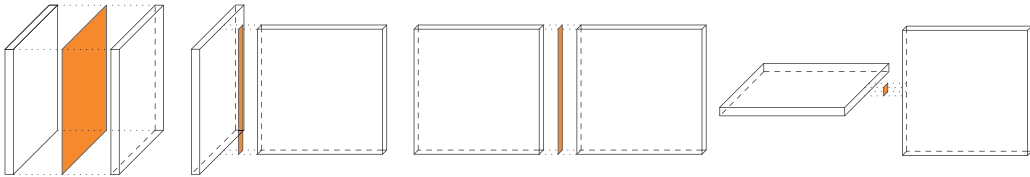
3.2.1 Klassifizierung

Die im Bauwesen typischen Flachgläser weisen im Vergleich zu den beiden anderen Abmessungen eine verhältnismäßig geringe Dicke auf. Aus der Grundform einer rechteckigen und ebenen Tafel resultieren charakteristische Verbindungsvarianten für das Kleben, die systematisch geordnet werden können (Bild 25). In Abhängigkeit des räumlichen Bezugs zwischen den Glastafeln entsteht entweder eine flächige, eine linienförmige oder eine punktuell begrenzte Klebfuge. Flächige Klebungen setzen voraus, dass die Mittelebenen der Glastafeln parallel zueinander ausgerichtet sind. Verbundgläser (VG) und Verbund-Sicherheitsgläser (VSG) gehören in diese Kategorie, aber auch Überlappungsklebungen, bei denen die Klebfläche kleiner als die Glasfläche ist. Die Glasrahmen mit transparenter Eckklebung in Bild 24 sind ein Beispiel für eine solche Überlappungsklebung. Bei der Verbindung von zwei parallelen Glaskanten oder von einer Glaskante mit einer Glasfläche entsteht eine linienförmige Klebfuge. Dazu zählen zum Beispiel Klebverbindungen zwischen Fassade und Glasschwert sowie Fugenversiegelungen zwischen Verglasungen in der Gebäudehülle, die im

⁸⁹ Flachgläser werden in den meisten Veredelungsprozessen ohne Berücksichtigung der beiden unterschiedlichen Oberflächen verarbeitet. Automatische Stapel- und Transportsysteme wenden dabei ablaufbedingt mehrfach das Glas. Die Festlegung auf eine bevorzugte Glasoberfläche für das Kleben würde eine durchgängige Kennzeichnung erfordern und den Aufwand bei der Veredelung deutlich erhöhen. Gegebenenfalls bestehen Zielkonflikte mit Beschichtungen, die auf einer bestimmten Glasoberfläche aufgebracht werden, oder mit dem Laminationsprozess von VSG, bei dem häufig die Atmosphärenseite zur Folie gedreht wird.

Allgemeinen aber nicht zum Abtrag von Lasten vorgesehen sind. Die letzte mögliche Kombination ist eher theoretischer Natur. Liegen die zu fügenden Glastafeln nicht in einer Ebene und auch nicht parallel zueinander, können sie nur in einem Punkt zusammengebracht werden. Eine solche Verbindung kann nur sehr geringe Kräfte übertragen und ist wegen der konzentrierten Lasteinleitung nicht für Glas geeignet. Eine praktische Anwendung erscheint nicht sinnvoll.

Glas – Glas



Alternativmaterial – Glas

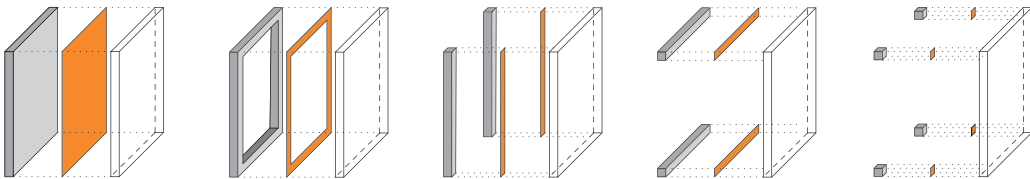


Bild 25

Prinzipdarstellung verschiedener Klebfugenvarianten. Klebung zwischen zwei Flachgläsern sowie zwischen Flachglas und einem weiteren (opaken) Material.

Eine Kombination mit einem anderen Material erweitert den Katalog an möglichen Verbindungsgeometrien, da geeignete Fügемaterialien in der Regel in größerer Formenvielfalt als das Glas erhältlich sind. Verschiedene Varianten von Klebverbindungen zwischen Flachglas und einem anderen Fügемaterial zeigt Bild 25. Nachfolgend sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit typische Anwendungsgebiete aufgeführt.

Flachglas lässt sich ebenfalls mit anderen Materialien vollflächig verkleben. Dabei muss die Verträglichkeit der Ausdehnungsdifferenzen bei einer Temperaturänderung besonders beachtet werden. Kompositpaneele, bei denen ein Deckglas einseitig auf eine Trägerplatte geklebt wird, kommen beispielsweise bei hochwertigen hinterlüfteten Fassaden zur

Anwendung.⁹⁰ Diese Verbundelemente bieten wegen ihrer sehr ebenen und glänzenden Oberfläche und ihrer farbigen Emaillierungen oder Beschichtungen auf der Rückseite des Glases umfangreiche Gestaltungsmöglichkeiten für Fassaden. Darüber hinaus werden sie auch als Basis für gebäudeintegrierte Photovoltaik genutzt.

Bei Vorhangfassaden mit großflächigen Verglasungen sind linienförmige Klebungen weit verbreitet. Diese Systeme werden als Structural-Sealant-Glazing-Fassaden (SSG) bezeichnet. Die Verglasungen werden in der Regel werksseitig auf einen umlaufenden Tragrahmen oder ein umlaufendes Adapterprofil aus Aluminium oder nichtrostendem Stahl geklebt. Der Randverbund von Mehrscheiben-Isolierverglasungen zählt ebenso zu den linienförmigen Klebverbindungen. Die Sekundärdichtung hält die einzelnen Glasschichten des Isolierglasaufbaus zusammen. Der Randverbund von Structural-Sealant-Glazing-Systemen ist den gleichen Einwirkungen ausgesetzt wie die eigentliche Klebfuge.

Geklebte Punkthalter sind bei Glasfassaden noch relativ selten. Auf punktuelle Klebverbindungen wirken höhere Belastungen, da die Klebflächen im Vergleich zu linienförmigen Klebungen deutlich kleiner ausfallen. Da keine Bohrungen mehr erforderlich sind, lassen sich Spannungskonzentrationen im Glas auch mit geklebten Punkthaltern reduzieren. Einige Projekte aus den letzten Jahren zeigen, dass vorzugsweise höherfeste Klebstoffe verwendet werden.⁹¹

3.2.2 Einordnung der Holz-Glas-Verbundbauweise

Die in Kapitel 2 dokumentierten Anwendungen und Entwicklungsansätze zum Holz-Glas-Verbund basieren ausnahmslos auf linienförmigen Klebungen. Diese eindeutige Ausrichtung auf einen Klebfugentyp resultiert aus dem natürlichen

⁹⁰ Verschiedene Hersteller bieten solche Fassadenpaneele (Lithodecor 2015, S.4 und Sto 2015, S 36 ff.) an. Die vollflächige Klebung überträgt die auf das Glas wirkende Lasten und dessen Eigengewicht.

⁹¹ Beispiele für Verglasungen mit geklebten Punkthaltern: Fassade Dow Corning Vertriebszentrum in Feluy, Belgien (Vergleiche Sitte 2012, S. 307 ff.), Dachkonstruktion des Museo Würth in Agoncillo, Spanien (Vergleiche Weller 2011, S. 637 ff.) und gläserne Eingangshalle des Prinsenhof Glass Museum in Delft, Niederlande (Vergleiche Eekhout 2009, S. 66).

Wachstum und der anisotropen Materialstruktur von Holz. Aus dem Baumstamm als Urform lassen sich hauptsächlich stabförmige Vollholzformate gewinnen. Die Fasern verlaufen in Wuchsrichtung und bestimmen so die richtungsabhängigen Materialeigenschaften. Die höchste Beanspruchbarkeit eines Bauteils aus Holz ergibt sich dementsprechend parallel zur Faser. Holzwerkstoffe in Plattenform bieten darüber hinaus eine zweiachsale Tragwirkung. Daher sind auch flächige Klebverbindungen zwischen Glas und Holz denkbar, wurden aber bisher nicht umgesetzt.

Die Holzprofile werden bei Verglasungen, die in Scheibenebene beansprucht werden, im Bereich der Glaskanten angeordnet, bei ausfachenden Fassadenelementen ebenso. Bei Plattenbiegung kann eine Holzverstärkung auf der unter Zugspannung stehenden Glasoberfläche sinnvoll sein. Sie beeinträchtigt jedoch die Transparenz. Diese wiederum steht bei vielen Entwicklungssträngen der Holz-Glas-Verbundbauweise im Vordergrund. Für Anwendungen in der Gebäudehülle werden daher häufig die Konstruktionsgrundsätze von Structural-Sealant-Glazing-Fassaden adaptiert, deren Unterkonstruktion häufig nur geringe Ansichtsbreiten aufweisen.

Eine weitere Gemeinsamkeit zum Fassadenbau und so auch zum Structural-Sealant-Glazing ist der hohe Vorfertigungsgrad, der den modernen Holzbau auszeichnet. Die Herstellung ganzer Wand- oder Deckenelemente im Werk setzt auch den Einbau der Verglasungen voraus. Das ist ein Vorteil für die Klebtechnik. Klebverbindungen sollten unter möglichst gleichbleibenden und kontrollierbaren Umgebungsbedingungen hergestellt werden.⁹²

Der folgende kurze Abriss zum Stand der Technik von Structural Sealant Glazing zeigt die wesentlichen konstruktiven Grundsätze und die Vorgehensweise bei der baupraktischen Berechnung. In Bezug auf die beim Holz-Glas-Verbund vorgesehene Ausnutzung der Scheibentragwirkung von Glas werden zusätzlich Ganzglaskonstruktionen besprochen.

⁹² Diese Forderung betrifft neben der Temperatur und Luftfeuchtigkeit auch die Staubbelastung. Die Kleboberflächen dürfen nach der Reinigung nicht mehr kontaminiert werden. Die Staubbelastung ist in einem Holz verarbeitenden Unternehmen höher als in einem Metallbau- oder Glasveredelungsbetrieb. Daher muss auf eine räumliche Trennung der Prozesse Kleben und Holzbearbeitung geachtet werden.

3.2.3 Structural Sealant Glazing

Die ersten geklebten Fassaden entstanden Mitte der 1960er Jahre in den USA. Die Technologie setzte sich dann in den 1980er Jahren vorrangig in Form von allseitig linienförmig geklebten Isolierverglasungen durch.⁹³ Heute gehören die mit Silikonklebstoffen gefügten Verglasungssysteme zum Standardrepertoire der führenden Fassadenhersteller. Die Verklebung erfolgt für gewöhnlich im Werk. Architektonisch überzeugen Structural-Sealant-Glazing-Fassaden durch eine sehr homogene Oberfläche (Bild 26). Hervorstehende Halteleisten können entfallen, da die rückseitige Klebung auf Zug und Druck belastet werden kann.



Bild 26
Structural-Sealant-Glazing-Fassade. Bergrestaurant Pardorama im Skigebiet Ischgl in Österreich.

Foto: Steindl Glas

Das wirkt sich positiv auf die Wärmedämmeigenschaften der Fassade aus. Durchgehende Verschraubungen sind nicht notwendig. Thermische Verluste im Bereich der Glasstöße fallen daher geringer aus als bei konventionellen Pfosten-Riegel-Fassaden.⁹⁴ Die verwendeten Kleb- und Dichtstoffe weisen eine hervorragende Alterungsbeständigkeit auf, die auf die hybride chemische Basis aus organischen und anorganischen Verbindungen bei Silikonen zurückzuführen ist.⁹⁵

⁹³ Vergleiche Klosowski 2009, S. 15 f.

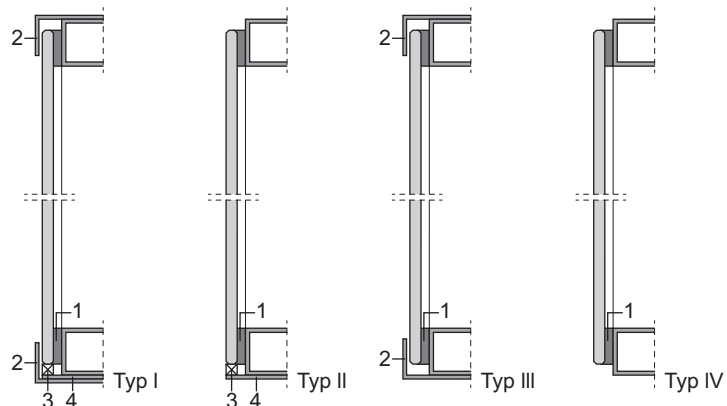
⁹⁴ Vergleiche Carbary 2009, S. 91.

⁹⁵ Die Siloxan-Gruppen, eine Verbindung aus Silicium- und Sauerstoffatomen, sind wesentlich für die charakteristischen Eigenschaften von Silikonen, wie hohe UV-Beständigkeit, geringe Reaktivität und geringe Temperaturabhängigkeit des Materialverhaltens, verantwortlich. (Vergleiche Wolf 2009, S. 163 f.)

Die Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (ETAG 002) unterscheidet vier verschiedene Klassen von Structural-Sealant-Glazing-Systemen (Bild 27). Die Verglasung lagert bei Typ I und II auf einem Glasträger, der das Eigengewicht aufnimmt und an die Unterkonstruktion der Fassade weiterleitet. Die Klebung trägt bei diesen gestützten Systemen nur Beanspruchungen mit kurzer Einwirkungsdauer, wie beispielsweise Windlasten, ab. Im Gegensatz dazu wirken bei den ungestützten Systemen (Typ III und IV) auch permanente Lasten auf die Klebverbindung. Eine weitere Unterteilung erfolgt in Bezug auf zusätzliche, mechanische Sicherungssysteme, die im unwahrscheinlichen Fall des Versagens der Klebverbindung ein Herausrutschen der Verglasung verhindern. Die Anwendbarkeit der verschiedenen Typen kann entsprechend nationaler Vorgaben⁹⁶ beschränkt sein.

Bild 27
Unterscheidung der SSG-
Typen gemäß ETAG 002-1,
Tab. 1 und Bild 1. Systeme
mit (I und II) und ohne Glas-
träger (III und IV), sowie mit
(I und III) und ohne mecha-
nische Sicherung (II und IV).

- 1 tragende Klebfuge
- 2 mechanische Sicherung
für Ausfall der Klebfuge
- 3 Klotzung
- 4 Glasaufleger



Viele Systemhersteller setzen heute auf spezielle Isolierglas-einheiten mit U-profilförmigen Taschen im Randverbund. Die Verglasungen werden bei der Montage mit Verdrehkrallen, die in der Fuge zwischen zwei Verglasungen liegen, an den Fassadenprofilen befestigt (Bild 28). Das innere Scheibenpaket wird mechanisch, die äußere Scheibe durch die last-abtragende Sekundärdichtung des Randverbunds gehalten.

⁹⁶ Die bauaufsichtlichen Regelungen in Deutschland sind in Bezug auf geklebte Verglasungen im Vergleich zu anderen europäischen Ländern sehr restriktiv. Bis auf wenige Ausnahmen dürfen nur Structural-Sealant-Glazing-Fassaden realisiert werden, bei denen keine ständigen Lasten über die Klebung abgetragen werden und bei denen ab einer Einbauhöhe von acht Metern auch mechanische Sicherungen für den Ausfall der Klebung vorhanden sind. (Vergleiche LTB II, Anlage 2/1.)

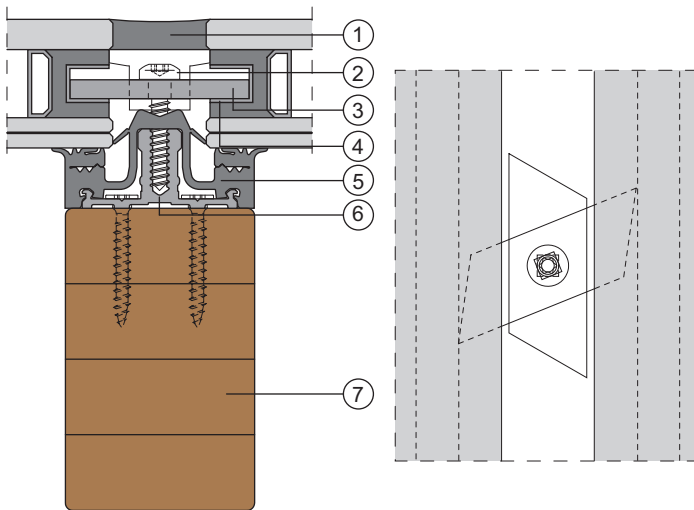


Bild 28

Horizontalschnitt und Ansicht eines Pfostens eines SSG-Bausatzes. Raico Therm⁺ SG2⁹⁷ (nach Raico 2011, S. 23 und S. 469 ff.) kombiniert mit einem Fassadenprofil aus Brettschichtholz. Andere Materialien für die Unterkonstruktion sind möglich.

- 1 Nassversiegelung
- 2 Selbstschneidende Schraube mit Dämmblock
- 3 Verdrehkralle
- 4 Integriertes U-Profil im Randverbund
- 5 Dichtung
- 6 Grundprofil mit Schraubkanal
- 7 Fassadenpfosten

Neuentwickelte Klebstoffsysteme und innovative Tragwerkskonzepte erweitern aktuell das Anwendungsspektrum der klassischen Structural-Sealant-Glazing-Systeme. Seit kurzer Zeit ist beispielsweise eine neue Klebstoffformulierung am Markt verfügbar, die eine höhere Beanspruchbarkeit als klassische Silikonklebstoffe aufweist. Die leistungsfähigere Klebverbindung erlaubt geringere Fugen- und damit auch reduzierte Ansichtsbreiten der Fassadenprofile. Größere Verglasungsformate können verbaut oder Klebverbindungen in sprengwirkungshemmenden Fassadenkonstruktionen realisiert werden.⁹⁸ Stetig wachsende Erkenntnisse zum Materialverhalten und bessere Simulationswerkzeuge führen zu immer anspruchsvolleren Glaskonstruktionen. Die Bauteile der Unterkonstruktion werden dabei häufig so schlank ausgebildet, dass diese Tragwerke nur realisiert werden können, wenn die Verglasungen in der Gebäudehülle als lastabtragende Elemente aktiviert werden. Solch ein Ansatz wurde beispielsweise für die Glaskonstruktion eines Retail Stores in Highland Village in Houston (USA) gewählt.⁹⁹

⁹⁷ Für die Anwendung des Systems in Deutschland muss eine Zustimmung im Einzelfall beantragt werden. (Vergleiche Raico 2011, S. 471).

⁹⁸ Vergleiche Wagner 2012, S. 318 ff. und ETA-11/0392.

⁹⁹ Das Glasdach des Retail Store wirkt als aussteifende Scheibe. Die Silikonklebungen erzeugen eine nachgiebige aber tragfähige Verbindung zwischen den einzelnen Verglasungen der Dachkonstruktion. Durch den Ansatz des Tragvermögens der Klebung konnte die Gebrauchstauglichkeit des schlanken Tragwerks nachgewiesen werden. (Vergleiche Peters 2014, S. 65.)

Mit zunehmender Langzeiterfahrung wächst das Vertrauen in diese Klebungen. Eine Langzeituntersuchung an einer Fassade in Bayern konnte beispielsweise zeigen, dass auch nach 25 Jahren Nutzungsdauer die Vorgaben der ETAG 002 erfüllt werden.¹⁰⁰ In Sonderfällen sind mittlerweile auch linienförmige Silikonklebungen ohne mechanische Sicherung und mit Eigengewichtsabtrag über die Klebung in Deutschland möglich, wie das Beispiel der Fassade des Bürogebäudes Z3 in Stuttgart zeigt (Bild 29).

Bild 29

Fassade aus Holz, Aluminium und Glas. Bürogebäude Z3 in Stuttgart. Die grauen Brüstungselemente aus emailliertem ESG sind auf der Rückseite und somit nicht sichtbar mit zwei vertikalen Tragprofilen verklebt. Die Lasten werden nur über die linienförmige Klebung abgetragen. Die Anwendbarkeit der Bauart wurde durch eine Zustimmung im Einzelfall nachgewiesen.¹⁰¹

Foto: Ed. Zueblin AG



3.2.4 Ganzglaskonstruktionen

Puristische Glasbauwerke, bei denen der Anspruch besteht, selbst primäre Tragelemente transparent auszubilden, erfordern Verbindungsdetails, die möglichst dezent gestaltet sind und den ästhetischen Gesamteindruck der Konstruktion nicht beeinträchtigen. Die Klebtechnik bietet oftmals die einzige Möglichkeit, diese Forderung zu erfüllen.¹⁰² Gleichzeitig wird in solchen Konstruktionen die Klebung im Vergleich zu einer Structural-Sealant-Glazing-Fassade deutlich stärker

¹⁰⁰ Am ift Rosenheim wurde 1985 eine Fassade ohne mechanische Sicherung und Klotzungen für das Eigengewicht errichtet, die während der Nutzung kontinuierlich überwacht wurde. Nach 23 Jahren Nutzungsdauer und einer weiteren Einlagerung für 2 Jahre wurde die Haftfestigkeit an den natürlich gealterten Verglasungen überprüft und mit den Anfangswerten verglichen. (Vergleiche Lieb 2013, S. 49 ff.)

¹⁰¹ Vergleiche EnOB 2015 und Popp 2015, S. 57.

¹⁰² Eine Alternative zum Kleben stellen einlamierte Metallteile dar, über die die Glaselemente verbunden werden. Die Laminationstechnologie wird beispielsweise bei Peters (2014, S. 64 f.) beschrieben.

beansprucht. Neue oder im Bauwesen noch nicht gebräuchliche Klebstoffe kommen zum Einsatz. Bauspezifische Langzeiterfahrungen liegen dafür jedoch kaum vor. Letztendlich können nur gebaute Konstruktionen von der Leistungsfähigkeit der Klebtechnik überzeugen. Daher lohnt es sich, bestimmte Experimentalbauten und Pilotprojekte eingehender zu betrachten.

Eine vollständig geklebte Schalenkonstruktion aus sphärisch gebogenen Glasscheiben steht auf dem Gelände der Universität in Stuttgart. Dem Bau ging eine umfangreiche wissenschaftliche Untersuchung voraus, bei der ein geeigneter steifer Epoxidharzklebstoff für die Stoßfugenverbindung identifiziert wurde.¹⁰³ Ursprünglich als temporäre Experimentalstruktur errichtet, trotz des Schalentragwerk mit einer Spannweite von etwa 8 m nun schon seit 2004 der Witterung. Die Klebfugen sind seitdem Wind und Schnee, hoher Luftfeuchtigkeit, jahres- und tageszeitlichen Schwankungen der Temperatur sowie direktem Sonnenlicht ausgesetzt. Die Glaskonstruktion und insbesondere die Klebfuge werden regelmäßig begutachtet. Die Konstrukteure des Experimentalbaus stellen fest, dass in den zehn Jahren seit der Errichtung die Klebfugen weder versprödet noch anderweitig negative Veränderungen an ihnen aufgetreten sind. Sie gewinnen sogar die Erkenntnis, dass die Sicherheitsbeiwerte anfänglich zu hoch angesetzt wurden.¹⁰⁴

Ein weiterer Vorreiterbau befindet sich vor dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) in Dresden. Die etwa 4,4 x 7,7 x 2,8 m große Glasbox (Bild 30) wird ausschließlich durch Klebungen zusammengehalten. Zum Zeitpunkt der Errichtung im Jahr 2009 stellte dieser Bau ein baurechtliches und bautechnisches Novum in Deutschland dar. Erstmals konnte bei einem Ganzglastragwerk komplett auf metallische Verbindungsmittel verzichtet werden. Ein begleitendes Forschungsvorhaben ebnete den Weg von der ersten Entwurfsidee bis hin zum fertigen Projekt. Das Zustimmungungsverfahren erforderte zudem umfangreiche Untersuchungen, die die Tragfähigkeit und die Dauerhaftigkeit der Klebverbindung bestätigten. Das System ist redundant aufgebaut, sodass noch Tragreserven bestehen, wenn eine

¹⁰³ Vergleiche Blandini 2007, S. 501.

¹⁰⁴ Vergleiche Blandini 2014, S. 83.

Klebung ausfallen oder eine Verglasung beschädigt werden sollte.¹⁰⁵ Mittlerweile wurden Nachfolgeprojekte realisiert, die sich einer ähnlichen Konstruktionsweise bedienen.¹⁰⁶ Diese Entwicklung zeigt, wie Pilotprojekte dabei helfen, Vorbehalte gegenüber neuen Technologien im Bauwesen abzubauen.

Bild 30

Ganzglaskonstruktion zum Schutz historischer Drucktanks. Leibniz Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden. Das Haupttragwerk besteht aus vier gläsernen Rahmen, die an den Eckpunkten mit einem transparenten, strahlungshärtenden Acrylatklebstoff verbunden sind. Rahmen und Außenhülle wurden auf der Baustelle mit SSG-Silikon verklebt.¹⁰⁷

Foto: Stefan Unnewehr



3.3 Planungsstrategien

3.3.1 Sicheres Bauteilversagen

Der Schutz von Leben und Gesundheit gilt als grundlegende Anforderung an eine bauliche Anlage.¹⁰⁸ Daraus leiten sich die wesentlichen Planungsgrundsätze für den Entwurf von Tragwerken ab. Unter anderem sollte ein plötzliches Versagen des Tragwerks ausgeschlossen werden.¹⁰⁹ Bedingt durch sein sprödes Bruchverhalten, kann reines Flachglas diese Forderung nur in bestimmten Anwendungs- und Beanspruchungssituationen erfüllen. Wie für andere Baustoffe auch, lässt sich die Standsicherheit eines Glasbauteils auf

¹⁰⁵ Vergleiche Weller 2010a, S. 36.

¹⁰⁶ Geklebte Glasrahmenecken wurden bei einem gläsernen Verbindungsgang im Hof von Schloss Grimma (Vergleiche Voit 2014, S. 90 f.) und für einen Windfang am Café-Restaurant Waldschlösschen in Bad-Elster eingesetzt. Im Unterschied zum Pilotbau am Leibniz Institut in Dresden sind diese Ganzglaskonstruktionen öffentlich zugänglich.

¹⁰⁷ Vergleiche Weller 2010a, S. 35.

¹⁰⁸ MBO §3 (1): „Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass [...] insbesondere Leben, Gesundheit [...] nicht gefährdet werden.“

¹⁰⁹ Vergleiche DIN EN 1990, 2.1 (5).

Basis von charakteristischen Materialfestigkeiten und entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten für typische Einwirkungskombinationen nachweisen. Real existieren jedoch zusätzliche Einwirkungsszenarien, die rechnerisch nur schwer, beziehungsweise überhaupt nicht erfasst werden können, aber dennoch den Bruch der Verglasung verursachen können. Hierzu zählen beispielsweise unplanmäßige Zwangsbeanspruchungen durch Montagefehler, unsachgemäße Nutzung oder auch Vandalismus. Eine fachgerechte Planung im Glasbau beinhaltet daher immer eine Beurteilung des Risikos, das nach einem Bruch von der Verglasung ausgeht. Für viele Anwendungsbereiche ergibt sich daraus die Forderung nach einem sicheren Versagen des Glasbauteils.

Eine erhebliche Verletzungsgefahr geht direkt von den scharfkantigen Splittern einer gebrochenen Glasscheibe aus. Spezielle Glasprodukte bieten hier deutliche Vorteile gegenüber monolithischem Floatglas. Einscheibensicherheitsgläser (ESG) zerfallen beispielsweise in viele kleine würfelförmige Bruchstücke, an denen man sich schwerer schneiden kann. Bei Verbund-Sicherheitsgläsern (VSG) bleiben die Scherben an der Kunststoffzwischenlage haften. Diese Gläser werden daher dort verwendet, wo Personen gegen- oder aufprallen können.

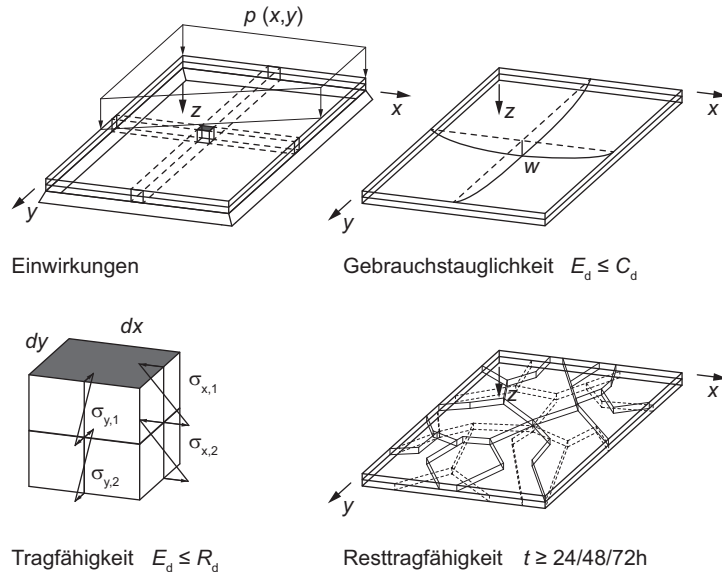
Zahlreiche Glasanwendungen erfordern neben diesem Schutz vor schweren Schnittverletzungen noch eine weitergehende Begrenzung der Schadensfolgen. Bei Horizontalverglasungen, begehbaren Verglasungen oder absturzsichernden Verglasungen muss beispielsweise verhindert werden, dass gefährliche Bruchstücke herabfallen, die Glasscheibe im Ganzen herausrutscht oder dass Personen durch die Verglasung hindurchstürzen können. Solche Verglasungen müssen auch nach Bruch noch tragfähig sein. Allseitig gelagerte Verbund-Sicherheitsgläser aus grob brechenden Glasarten weisen im Allgemeinen die notwendige Stoßsicherheit und Resttragfähigkeit auf.

Die Betrachtung einer verbleibenden wenn auch verminderten Tragfähigkeit nach Glasbruch kennzeichnet den spezifischen Nachweiskanon für den Glasbau. Neben den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit muss die Resttragfähigkeit einer Verglasung nachgewiesen werden (Bild 31). Oftmals genügt es allerdings, geeignete

Glasaufbauten zu verwenden und konstruktive Randbedingungen zu erfüllen, die durch die Technischen Baubestimmungen¹¹⁰ vorgegeben werden. Weicht die Konstruktion davon ab, kann eine ausreichende Resttragfähigkeit auch in Versuchen an Originalbauteilen belegt werden.¹¹¹

Bild 31

Typische Nachweise im Glasbau am Beispiel einer allseitig gelagerten Horizontalverglasung aus Verbund-Sicherheitsglas. Durchbiegungsnachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, Nachweis der Zugspannungen an der Glasoberfläche im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Nachweis der Resttragfähigkeit. Die Verglasung muss nach Bruch einer oder mehrerer Schichten des VSG für eine bestimmte Zeit standstillig bleiben. Ebenso dürfen keine gefährlichen Splitter herunterfallen. Die erforderliche Reststandzeit ergibt sich aus dem jeweiligen Anwendungsfall.



3.3.2 Redundanz und Versagensszenarien

Bei ausfachenden Verglasungen genügt es, die Resttragfähigkeit des jeweiligen Scheibenaufbaus im Zusammenspiel mit seiner Lagerung zu beurteilen. Ist die Verglasung jedoch notwendiger Bestandteil eines komplexeren Tragsystems, müssen neben dem Eigengewicht und den direkten Einwirkungen auf die Scheibe zusätzliche Lasten abgetragen und weitergeleitet werden. Ein lokales Glasversagen kann sich hier auf das gesamte Tragsystem auswirken. Insbesondere in stabilitätsgefährdeten Tragwerken, in denen die einzelne Verglasung in ihrer Scheibenebene auf Druck beansprucht

¹¹⁰ In den Normenteilen DIN 18008-2, -3, -4, -5 und -6 sind Glasaufbauten und konstruktive Randbedingungen beschrieben, bei deren Einhaltung der Nachweis der Resttragfähigkeit bzw. Stoßsicherheit als erfüllt gilt.

¹¹¹ DIN 18008-4, -5 und -6 bestimmen für konkrete Anwendungsfälle die Durchführung experimenteller Nachweise zum Nachweis der Resttragfähigkeit bzw. Stoßsicherheit. Eine Übersicht zu typischen Versuchen an Verglasungen findet sich in der Grundlagenliteratur. (Vergleiche bspw. Weller 2013a, S. 164 ff. und Siebert 2012, S. 174 f.)

wird, führt der Bruch aller Glasschichten im Verbundglasaufbau zum Ausfall des betroffenen Elements. Ein Totalversagen infolge dieser Beschädigung kann dann nur verhindert werden, wenn alternative Lastpfade aktiviert werden. Glastragwerke müssen daher redundant aufgebaut sein.

Der singuläre Charakter vieler Ganzglaskonstruktionen erschwert es jedoch, relevante Versagensszenarien pauschal vorzugeben. Das Planungsteam muss daher anhand der Geometrie des Tragwerks und der erwarteten Einwirkungen realistische Schädigungen und Schadensfolgen für jedes Bauprojekt individuell erarbeiten und anschließend mit den zuständigen Bauaufsichtsbehörden abstimmen.¹¹² Diese Analyse ist wegen der Komplexität redundanter und somit statisch überbestimmter Tragsysteme häufig nur rechnergestützt möglich.

Die Idee, ganze Gebäude oder einen Teil davon mithilfe der Glasfassade auszusteiern, lässt sich demnach nur mit einer redundanten Anordnung der einzelnen Verglasungen in die Realität umsetzen. Jede Aussteifungsebene muss pro Geschoss aus mindestens zwei tragenden und voneinander unabhängigen Verglasungen bestehen. Dadurch wird der Ausfall einer einzelnen Scheibe kompensiert. Im Zuge der in Kapitel 4 geführten Analyse werden hierzu Versagensszenarien an einem fiktiven Beispielgebäude mit einer tragenden Holz-Glas-Verbundfassade untersucht.

Eine hohe Tragwerksredundanz und das Durchspielen von Versagensszenarien dienen ebenso wie eine ausreichende Resttragfähigkeit der einzelnen Glaselemente dazu, Glaskonstruktionen robust zu gestalten. Eine hohe Robustheit resultiert allerdings nur aus dem Zusammenspiel mit weiteren Maßnahmen. Hierzu zählen unter anderem die Begrenzung von beziehungsweise der Schutz vor kritischen Einwirkungen sowie eine regelmäßige Überwachung und Wartung der Konstruktion.¹¹³

¹¹² Ein Beispiel für die Betrachtung verschiedener Versagenszustände findet sich bei Weller (2010a, S. 36). Bei der Bemessung der Glaseinhausung am IFW Dresden (Bild 30) wurde unter anderem das Versagen der transparenten Klebverbindung an der Rahmenecke und der Totalausfall der Dach- und Riegelemente aus Glas untersucht.

¹¹³ Eine Übersicht verschiedener Konstruktionsmaßnahmen zur Robustheit findet sich bei Harte (2007, S. 233).

3.3.3 Besonderheiten bei geklebten Verglasungen

Kleben erweitert die zuvor beschriebene Risikobeurteilung und Tragwerkskonzeption bei einer Glaskonstruktion um zahlreiche Parameter. Das zeit- und temperaturabhängige Materialverhalten vieler Klebstoffe führt zu neuen Einwirkungskombinationen und Nachweisen, die eine Tragwerksanalyse bei hohen oder tiefen Temperaturen sowie eine Unterscheidung in kurzzeitig und langfristig wirkende Lasten erfordern. Hinzu kommt eine mögliche Veränderung der Klebstoffeigenschaften durch Umwelteinflüsse. Alterungsprozesse können sich auf das Materialverhalten und die Bindungskräfte in der Grenzfläche zum Füge teil auswirken. Für den Nachweis der Verbindung werden künstliche Alterungsprozesse vorgegeben, die jedoch keine Aussage zum tatsächlichen Degradationsniveau nach einer bestimmten Nutzungsdauer zulassen.

Vielfach fehlen auch noch die entsprechenden Langzeiterfahrungen. Die Versagenswahrscheinlichkeit kann nur schwer quantifiziert werden. Eine aus der Fassade herabfallende Verglasung stellt ein großes Risiko bis hin zur Gefährdung von Menschenleben dar. In vielen Fällen werden daher zusätzlich mechanische Halter vorgesehen, um die Verbindung redundant auszubilden.

Am Beispiel von Structural-Sealant-Glazing-Systemen kann diese Strategie anschaulich nachvollzogen werden. Diese Verglasungen müssen zumindest in Deutschland ab einer Einbauhöhe von acht Metern mit zusätzlichen mechanischen Haltern versehen werden.¹¹⁴ Das Tragsystem wird dadurch robuster, da unberücksichtigte oder nicht durch Berechnung abbildbare Einflüsse¹¹⁵ kein komplettes Versagen hervorrufen können. Die globale Systemsicherheit wird allerdings wegen der hohen Sicherheitsbeiwerte, die für die Klebung gelten, durch das Haltesystem nicht mehr signifikant gesteigert.¹¹⁶ Aber auch ohne mechanische Sicherungssysteme kann eine Klebverbindung redundant ausgeführt werden.

¹¹⁴ LTB II, Anlage 2/1.

¹¹⁵ Hierzu zählen z. B. Fehler bei der Ausführung oder unberücksichtigte Unverträglichkeiten zwischen dem tragenden Klebstoff und anderen Materialien in der Fassade.

¹¹⁶ Vergleiche Shen 1996, S. 30 f.

Das beweist beispielsweise die Fassade am Fraunhofer Institut in Würzburg (Bild 32). Die opaken Glaselemente der frei geformten Gebäudehülle wurden auf der Rückseite doppelt verklebt (Bild 33). Im Zuge des Zustimmungsverfahrens wurde zudem ein spezieller Wartungsplan entwickelt und vereinbart. Im jährlichen Turnus wird die Fassade durch eine Prüfstelle überwacht, um Schäden frühzeitig zu erkennen und falls notwendig den Austausch defekter Element zu veranlassen.¹¹⁷



Bild 32

Labor und Technikum am Fraunhofer Institut für Silicatforschung (ISC) in Würzburg. Die opaken Glaselemente mit zylindrischer und asphärischer Krümmung werden über rückseitig aufgeklebte Adapterrahmen aus Aluminium gehalten.

Foto: Christoph Seelbach
© Saint-Gobain Glass

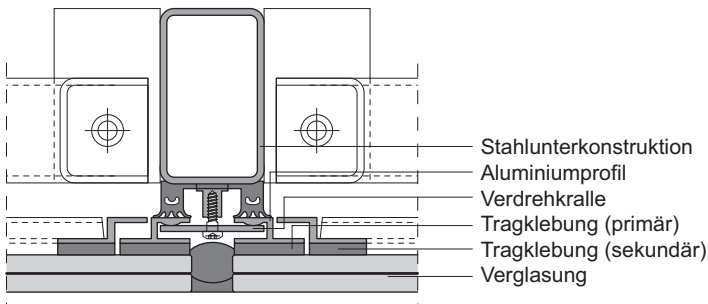


Bild 33

Detailschnitt durch das Haltesystem im Bereich der Horizontalverglasungen nach Lahr (2013). Die zweite Klebung wird erst wirksam, wenn die erste komplett versagt hat und die Verglasung ein Stück aus der Fassaden-ebene herausgerutscht ist. Der Schaden wird durch den Versatz des betroffenen Elements sichtbar.

Der Schlüssel zu innovativen Glaskonstruktionen mit geklebten Verbindungen liegt daher neben einer robusten Konstruktionsweise auch in einer umfassenden Überwachung und Dokumentation der Klebarbeiten und in einer regelmäßigen Wartung und dem Monitoring der Verbindung auch während der Nutzungsphase des Gebäudes.

¹¹⁷ Vergleiche Lahr 2013.

3.4 Baurechtliche Rahmenbedingungen

3.4.1 Normung und Verfahrensweise in Deutschland

Die Technischen Baubestimmungen für den Glasbau wurden in Deutschland kürzlich umfassend novelliert. Die aktuelle Normenreihe DIN 18008 hat die bisher gültigen Technischen Regeln¹¹⁸ abgelöst. Damit basiert nun auch die Glasbemessung auf einem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept. DIN 18008¹¹⁹ enthält neben allgemeinen Bemessungs- und Konstruktionsgrundlagen (Teil 1) Regelungen zu typischen Glasanwendungen wie beispielsweise linien- oder punktförmig gelagerten Verglasungen in vertikaler, geneigter oder horizontaler Einbaulage (Teil 2 und 3). Hinzu kommen die Zusatzanforderungen an absturzsichernde, begehbare oder bedingt betretbare sowie durchsturzsichernde Verglasungen (Teil 4, 5 und 6), die sich aus der jeweils besonderen Beanspruchungs- und Risikosituation ergeben. Tragende Verglasungen sollen in Teil 7 behandelt werden, wobei der konkrete Anwendungsbereich dieses Normenteils im zuständigen Gremium noch diskutiert wird.¹²⁰

Die Bemessung und die Ausführung geklebter Verglasungen spart die Norm bisher grundsätzlich aus. Ob und inwieweit Klebverbindungen zukünftig in Teil 7 behandelt werden, ist noch offen. Geklebte Glaskonstruktionen zählen somit zu den unregulierten Bauarten (§21 (1) MBO), für die ein gesonderter Anwendbarkeitsnachweis erbracht werden muss. Gleiches gilt für unregelte Bauprodukte (§17 (3) MBO) wie den Klebstoff. Solche Bauprodukte und Bauarten dürfen nur für bauliche Anlagen verwendet beziehungsweise nur ange-

¹¹⁸ Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV), Technische Regeln für die Bemessung und die Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen (TRPV), Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen (TRAV).

¹¹⁹ Die grundlegenden Normenteile 1 bis 5 sind bereits bauaufsichtlich eingeführt. Teil 6 lag 2015 im Entwurf vor.

¹²⁰ Vergleiche NABau 2014, S. 147.

wendet werden, wenn dafür entweder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) vorliegt.¹²¹

Die genannten Verfahren differieren in Bezug auf ihren Ablauf, Aufwand und Regelungsumfang.¹²² Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung eignet sich für Bauprodukte und Bauarten, die in unveränderter Form wiederholt eingesetzt werden. Der Antrag muss dafür beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) eingereicht werden. Diese Zulassung gilt für fünf Jahre und kann verlängert werden (§18 (4) MBO). Ein Bausatz für eine Structural-Sealant-Glazing-Fassade ist hierfür ein typisches Beispiel. Geklebte Glaskonstruktionen, die über diese Standardanwendung hinausgehen, haben oft einen singulären Charakter und sind somit prädestiniert für eine einmalige Genehmigung. Eine Zustimmung im Einzelfall berücksichtigt die individuelle Risikosituation und den Wissensstand zum Zeitpunkt der Errichtung. Daraus leitet sich aber keine grundsätzliche Eignung der verwendeten Verfahren, Bauprodukte und Konstruktionsweisen ab. Die Zustimmung wird nur für das beantragte Bauvorhaben erteilt und darf nicht übertragen werden. Zuständig ist die oberste Bauaufsichtsbehörde des Bundeslandes, in dem das Bauwerk errichtet werden soll.

Ferner dürfen Bauprodukte oder Bausätze über eine Europäische Technische Bewertung (ETA) in Verkehr gebracht werden. In Deutschland wird der Einsatz von Bausätzen mit einer ETA jedoch durch weiterführende Anforderungen reglementiert. Das nationale Verfahren in Deutschland mit Ü-Zeichen und abZ unterscheidet sich dabei grundlegend vom europäischen, wobei sich insbesondere die Verantwortung vom Ausführenden der Klebung auf den Fassadenhersteller verschiebt.¹²³ Auf Details und die Einschränkungen, die derzeit unter dem deutschen Baurecht bestehen, wird in Abschnitt 3.4.3 gesondert eingegangen.

¹²¹ Für bestimmte Bauprodukte kann die Verwendbarkeit auch über ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP) nachgewiesen werden. Die Voraussetzungen gemäß §19 (1) MBO liegen aber bei geklebten Verglasungen oder Glaskonstruktionen nicht vor.

¹²² Ausführliche Beschreibungen der Verfahrensabläufe finden sich z. B. bei Weller (2013a, S. 157 ff.) und bei Siebert (2012, S. 143 ff.).

¹²³ Vergleiche Hepp 2013, S. 18 f.

3.4.2 Harmonisierung auf europäischer Ebene

Harmonisierte Normen sollen den Handel im europäischen Binnenmarkt erleichtern. Mehrere Ausschüsse des European Committee for Standardization (CEN) widmen sich daher verschiedenen Normen zur Spezifikation von Glasprodukten und zur Bemessung von Glas. Mit prEN 16612 gibt es einen europäischen Normenentwurf zur „Bestimmung des Belastungswiderstandes von Glasscheiben durch Berechnung und Prüfung“. Er allerdings für zahlreiche Einsprüche und Diskussionen gesorgt hat. Hintergrund sind die darin enthaltenen Bemessungsregeln für Glas, die nicht in den anfangs vorgesehenen Anwendungsbereich der Norm fallen. Die Norm sollte ursprünglich nur Produkteigenschaften und deren versuchstechnische Bestimmung für Glas im Bauwesen vorgeben. Die erforderliche Abgrenzung zu anderen Normungsprojekten läuft derzeit. Zukünftig soll die Glasbemessung in Europa in einem eigenen Eurocode 10 „Structural Glass“ geregelt werden.¹²⁴

Als erster Schritt auf diesem Weg wurde ein technischer Bericht¹²⁵ zusammengestellt, der neben den entsprechenden Berechnungs- und Konstruktionsprinzipien für konventionelle Glasanwendungen auch Hinweise auf zukünftige Regeln zu geklebten Verbindungen enthält. Darin wird zunächst das grundsätzliche Ziel formuliert, geklebte Verbindungen als Thema in die Norm aufzunehmen. Die angestrebten Maßnahmen beschränken sich im Wesentlichen auf die schon bekannten Anwendungen mit Silikon. Die einheitliche Behandlung verschiedener Klebstoffe wird wegen des unterschiedlichen Alterungsverhaltens als noch zu komplex eingeschätzt. Als Erweiterung gegenüber der aktuellen Praxis soll die Norm jedoch ein exakteres Berechnungsverfahren für die Klebung beinhalten, bei dem die Spannungen und die Dehnungen mithilfe von hyperelastischen Materialmodellen ermittelt werden. Darüber hinaus sollen verbesserte Alterungsszenarien die Lebensdauervorhersage der Klebverbindung erlauben.¹²⁶

¹²⁴ Vergleiche Feldmann 2015, S. 611 ff und Siebert 2015, S. 26 f.

¹²⁵ JRC Scientific and Policy Report (SaP Report). Guidance for European Structural Design of Glass Components. (Feldmann 2014.)

¹²⁶ Vergleiche Feldmann 2014, S. 179 f.

An der Standardisierung von SSG-Systemen arbeiten derzeit mehrere Ausschüsse des CEN. Die Technischen Gremien (TC) „Glas im Bauwesen“, „Türen, Tore, Fenster, Abschlüsse, Baubeschläge und Vorhangfassaden“ und „Fugendichtstoffe“ haben bereits verschiedene Normen erarbeitet (Bild 34), die letztendlich einheitliche Anforderungen für geklebte Verglasungen definieren sollen.

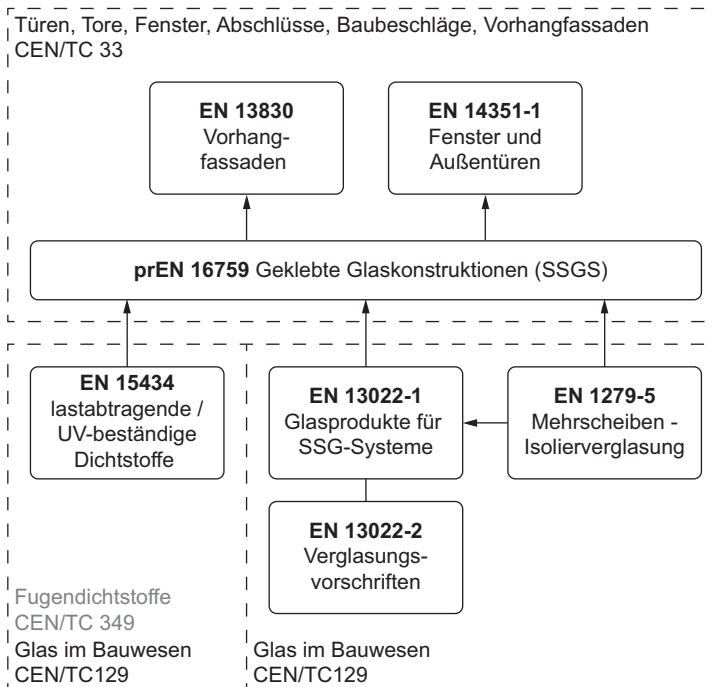


Bild 34

Zusammenhang zwischen verschiedenen europäischen Normen zum Kleben von Glas nach prEN 16759 ergänzt um die zuständigen Technischen Gremien im CEN. Die Normen regeln vorrangig Produkteigenschaften, um harmonisierte Leistungsanforderungen zu definieren. In den Regelwerken finden sich Teile der ETAG 002 wieder. Diese Richtlinie könnte zukünftig in diesem Normenspektrum aufgehen. Allerdings liegt das Mandat dafür momentan noch bei der EOTA. Um Kompetenzüberschneidungen bei der Normungsarbeit zu vermeiden, wurde für EN 15434 eine Übertragung des Mandats vom Ausschuss „Glas im Bauwesen“ zum Ausschuss „Fugendichtstoffe“ angefragt.

EN 16759, die vor Kurzem im Entwurf veröffentlicht wurde, übernimmt dabei die Schüsselfunktion und stellt den Bezug zu allen anderen relevanten Normen her. Diese Norm gilt sowohl für geklebte Verglasungen in einer Vorhangfassade als auch für geklebte Verglasungen in Fenstern und Türen. Die Leistungseigenschaften von Vorhangfassaden werden in EN 13830, die von Fenstern und Türen in EN 14351-1 spezifiziert. Teil 1 von EN 13022 beschreibt geeignete Glasprodukte für Structural-Sealant-Glazing Systeme, während der Teil 2 Vorgaben zur Montage und zum Kleben enthält. Die Anforderungen an Dichtstoffe und die Prüfverfahren, mit denen die produktspezifischen Eigenschaften wie die Adhäsion auf Glas oder auf Metall bestimmt werden können, werden darüber hinaus in EN 15434 erläutert. Ein weiterer Zusammenhang besteht mit EN 1279-5, in der Mehrscheiben-Isoliergläser und somit auch der Randverbund geregelt sind.

Aufgrund der Vielzahl der beteiligten Akteure und der unterschiedlichen Arbeitsbereiche ist das derzeitige Normenspektrum noch nicht konsistent und für den Anwender schwer zu überschauen. Zum Teil überschneiden sich die einzelnen Normen oder weisen bemessungsrelevante Inhalte auf, die nicht in eine Produktnorm gehören. Die Ausschüsse haben deshalb ihre Bereitschaft ausgedrückt, die betroffenen Normenprojekte zu koordinieren und die Arbeit gemeinsam fortzusetzen. In diesem Zusammenhang wurde die Übertragung des Mandats für die ETAG 002 von der European Organisation for Technical Assessment (EOTA) auf das CEN beantragt.¹²⁷ Falls die Europäische Kommission dem nachkommt, soll die Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen durch die angesprochenen Normen ersetzt werden. Schon jetzt setzen sich die Regelwerke aus deren Inhalten zusammen. Jedoch muss noch geklärt werden, inwieweit Structural-Sealant-Glazing-Systeme als tragend oder nicht tragend klassifiziert werden können und in welchem Dokument die Bemessung der Klebfuge festgelegt wird, da auch seitens des für die Glasbemessung zuständigen Gremiums ein Regelungsanspruch bekundet wurde.¹²⁸

Bis dahin bleibt die ETAG 002 das entscheidende Instrument für die Beurteilung von geklebten Verglasungen. Die Leitlinie wird oftmals auch bei Anwendungen zu Rate gezogen, die vom eigentlichen Regelungsbereich abweichen.¹²⁹

3.4.3 ETAG 002 – Leitlinie für Structural Glazing

In Deutschland werden Bauprodukte im Geltungsbereich harmonisierter Normen beziehungsweise Bauprodukte und Bausätze mit Europäischer Technischer Bewertung oder mit

¹²⁷ Schreiben von Vertretern der Ausschüsse CEN/TC 33, CEN/TC 129 und CEN/TC 349 an die Europäische Kommission vom 17.10.2011 zum Thema: SSGS-Structural Sealant Glazing Systems. Application to the European Commission for transferring ETAG 002 to CEN EN 13830, EN 15434, EN 13022-1 & EN 13022-2.

¹²⁸ Minutes of the meeting of the SSGS working group CEN/TC33/WG6, CEN/TC129/WG16, CEN/TC349 10.07.2014 in Paris.

¹²⁹ Die SSG-Fassade am Fraunhofer Institut ISC in Würzburg (Bild 32 und Bild 33) ist ein solches Beispiel. Das Glas erhielt eine rückseitige PU-Beschichtung, auf die Adapterprofile aus Aluminium geklebt wurden. Obwohl diese Materialkombination nicht in ETAG 002 geregelt wird, bildet die Richtlinie die Grundlage für die ZIE. (Vergleiche Lahr 2013.)

Europäisch Technischer Zulassung in der Bauregelliste B, Teil 1 (BRL) aufgeführt. Hierin finden sich auch die geklebten Glaskonstruktionen (Bausatz) und die dazugehörigen Silikonklebstoffe (Bauprodukt).¹³⁰ Die Liste verweist auf die ETAG 002. Der Anwendungsbereich beschränkt sich auf die in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Structural-Sealant-Glazing-Systeme mit werkseitiger Silikonverklebung.¹³¹

Teil 1 der Leitlinie definiert die Anforderungen und die zugehörigen Nachweisverfahren, mit denen die Brauchbarkeit eines entsprechenden Bauprodukts beziehungsweise Bausatzes – unterschieden in ungestützte und gestützte Systeme (Bild 27) – beurteilt werden kann. Neben Glas werden anodisiertes Aluminium und nichtrostender Stahl als geeignete Kleboberflächen berücksichtigt. Teil 2 und 3 erweitern diese Vorgaben um zusätzliche Beschichtungen auf Aluminium und um thermisch getrennte Profile beim Tragrahmen. Andere Substrate wie Kunststoff oder Holz werden nicht abgedeckt. Hersteller von Klebstoffen und Fassadensystemen können anhand der Leitlinie eine Europäische Technische Zulassung beziehungsweise neuerdings eine Europäische Technische Bewertung erlangen, die zum ungehinderten europaweiten Vertrieb und Einsatz berechtigt.¹³² Die ETAG 002 bleibt auch nach dem Inkrafttreten der neuen Bauproduktenverordnung (BauPVO), die die Bauproduktenrichtlinie (BPR) ersetzt, im Sinne eines Europäischen Bewertungsdokuments (EAD) gültig.¹³³

¹³⁰ BRL B, Teil 1, 2.4.4.13 und 3.4.4.13.

¹³¹ ETAG 002-1, 2.1. Nur für Silikonklebstoffe liegen derzeit bauaufsichtlich belastbare Versuchsergebnisse und Langzeiterfahrungen vor. Alternative Klebstoffe oder eine baustellenseitige Verklebung von Verglasungen erfordern eine Zustimmung im Einzelfall nach §20 MBO.

¹³² Die Bauproduktenrichtlinie (BPR) wurde vor Kurzem durch die Bauproduktenverordnung ersetzt (BauPVO). Die Verordnung trat in Teilen am 24.04.2011 und vollständig am 01.07.2013 in Kraft. Mit der Novellierung ändert sich auch das Beurteilungsverfahren. Die Europäische Technische Zulassung (European Technical Approval – ETA) wird nunmehr als Europäische Technische Bewertung (European Technical Assessment – ETA) bezeichnet. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage von harmonisierten Europäischen Bewertungsdokumenten (European Assessment Document – EAD). Bestehende ETAs bleiben weiterhin gültig. (Vergleiche Siebert 2012, S.132 ff.)

¹³³ „Leitlinien, die vor dem 01.07.2013 gemäß Art. 11 der Bauproduktenrichtlinie (89/106/EWG) veröffentlicht worden sind, können als Europäische Bewertungsdokumente verwendet werden.“ (LTB II, S. 1.)

Das deutsche Baurecht reglementiert teilweise die freie Verwendung von Bauprodukten und Bausätzen, die auf europäischer Ebene bereits spezifiziert worden sind, über Zusatzanforderungen in den Anlagen zur Bauregelliste und in der Liste der Technischen Baubestimmungen (LTB).¹³⁴ Wesentliche Spezifikation zu Bauprodukten oder zu Bausätzen mit CE-Kennzeichen müssen daher umständlich in unterschiedlichen Dokumenten recherchiert werden.¹³⁵ Derzeit wird beispielsweise für die Verwendung des Bauprodukts Silikonklebstoff in einem Bausatz zusätzlich eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Bauart eingefordert.¹³⁶

3.4.4 Der Weg zur geklebten Glaskonstruktion

Die vorangegangenen Erläuterungen zeigen, dass die Klebtechnik innovative Glasbauten fördert und neuartige Konstruktionsweisen hervorbringt. Für die Genehmigung einer solchen geklebten Glaskonstruktion muss man in Deutschland regulär eine Zustimmung im Einzelfall beantragen. Trotz der großen Vielfalt an möglichen Anwendungen und gegebenenfalls abweichenden Verfahren in anderen Ländern, gibt es dennoch Gemeinsamkeiten bei der Realisierung, die nachfolgend kurz zusammengefasst werden. Das Fügeverfahren beeinflusst dabei sämtliche Lebensphasen der Verbindung, beginnend bei Entwurf und Planung über Herstellung bis zum Ende der Nutzung.

In der Planungsphase kommt der Beschreibung des spezifischen Materialverhaltens des Klebstoffs, das sich grundlegend von den klassischen Konstruktionswerkstoffen im Bauwesen unterscheidet, eine hohe Bedeutung zu. Wegen der

¹³⁴ Diese Praxis wird von vielen Herstellern kritisiert. Der Europäische Gerichtshof (EuGh) hat die nationalen Zusatzanforderungen in Deutschland erst kürzlich als unzulässig erklärt: „Das Gericht urteilte, dass in Bauregellisten des DIBt enthaltene technische Zusatzanforderungen an bereits europäisch harmonisierte Bauprodukte unzulässige Handelshindernisse darstellten.“ (DIBt 2014) Das DIBt prüft derzeit, „...welche Reichweite das Urteil hat [...]. Insbesondere stellt sich auch die Frage der Übertragbarkeit auf andere Produkte im Geltungsbereich von harmonisierten Normen.“ (Ebenda) Geklebte Glaskonstruktionen sind davon zwar nicht konkret betroffen, dennoch bleibt abzuwarten, inwieweit sich das Urteil darauf auswirken wird. Der Abstimmungsprozess zwischen Bund, Ländern und DIBt läuft derzeit noch.

¹³⁵ Vergleiche Siebert 2012, S. 138 f.

¹³⁶ Vergleiche LTB II Anlage 2/1.

zeit- und temperaturabhängigen Klebstoffeigenschaften müssen zusätzliche Einwirkungsszenarien untersucht werden, die insbesondere die Parameter Einwirkungsdauer und Bauteiltemperatur berücksichtigen. Die entsprechenden Materialkennwerte werden üblicherweise an Prüfkörpern aus dem reinen Klebstoffmaterial und kleinen Fügeteilen bestimmt.¹³⁷ Zusätzlich müssen relevante Alterungseinflüsse identifiziert und die Dauerhaftigkeit der Verbindung entsprechend überprüft werden.

Die Materialbeschreibung in einem numerischen Modell ist dabei sehr komplex und eine fehlerhafte Interpretation der Ergebnisse nicht ausgeschlossen. Häufig wird daher eine experimentelle Überprüfung der Berechnungsergebnisse in einem Bauteilversuch erforderlich. Zudem kann es bei Klebstoffen, die zuvor noch nicht im Bauwesen eingesetzt wurden, notwendig sein, die genaue Zusammensetzung des Polymers zu bestimmen. Die Daten können dann mit dem tatsächlich eingesetzten Klebstoffmaterial abgeglichen werden, um einen Übereinstimmungsnachweis zu erbringen.

Dem Herstellprozess kommt die Schlüsselrolle für eine dauerhafte und sichere Klebverbindung zu. Der Aufbau von Adhäsionskräften und die Aushärtung des Klebstoffs hängen stark von den Umgebungsbedingungen, einer ordnungsgemäßen Verarbeitung des Klebstoffs und einer entsprechenden Vorbereitung der Substratoberflächen ab. Fehler bei der Reinigung und Vorbehandlung sowie beim Kleben selbst können nachträglich nur sehr schwer bis gar nicht korrigiert werden. Ebenso schwierig lässt sich die Qualität einer einmal ausgehärteten Klebung in der Konstruktion beurteilen, da die Überprüfung kaum zerstörungsfrei möglich ist. Daher müssen Qualitätskontrollen zur Mischqualität und zur Haftung die Klebarbeiten begleitend durchgeführt werden.¹³⁸ Proben mit identischen Materialkombinationen, die unter den gleichen Bedingungen hergestellt wurden, erlauben Rückschlüsse auf die tatsächliche Qualität der Klebschicht.

¹³⁷ Eine Übersicht zu geeigneten Materialcharakterisierungsverfahren wird beispielsweise in Weller 2011, S. 619 ff. gegeben.

¹³⁸ Typische Qualitätssicherungsmaßnahmen für Structural-Sealant-Glazing-Anwendungen werden in den Handbüchern von Herstellern zugelassener Silikonklebstoffe beschrieben (Dow Corning 2011, S. 31 ff. und Sika 2011, S. 13 ff.). Bei neuen Klebstoffen im Bauwesen müssen die Überwachungsmaßnahmen individuell definiert werden.

Klebverbindungen dürfen deswegen nur von fachkundigem Personal und bevorzugt im Werk ausgeführt werden. Bestimmte Verglasungen werden jedoch aufgrund ihrer Größe oder ihrer Konstruktionsweise auf der Baustelle verklebt. Dazu zählen beispielsweise komplett geklebte Ganzglaskonstruktionen oder Ganzglasfassadenecken aus Mehrscheiben-Isolierglas. Beim Kleben auf der Baustelle muss daher auf besondere Sorgfalt bei der Ausführung geachtet und Maßnahmen zur Qualitätssicherung ergriffen werden. Bauseitige Klebarbeiten müssen im Allgemeinen von einer fachkundigen Stelle fremdüberwacht werden.

Eine regelmäßige Überprüfung der Klebverbindung im Gebäudebetrieb kann für die notwendige Nutzungssicherheit sorgen, wenn nur unzureichende Langzeiterfahrungen bei neuartigen Klebstoffen oder Konstruktionsweisen vorliegen sollten. Das Monitoringkonzept muss dazu mit der obersten Bauaufsicht vereinbart und in Verantwortung des Bauherrn umgesetzt werden. Klebverbindungen sollten konstruktiv so gestaltet werden, dass ein Versagen frühzeitig erkennbar ist.

Auch mögliche Glasschäden spielen eine Rolle. Klebungen gehören – bis auf wenige Ausnahmen – zu den nicht lösba- ren Verbindungen. Bei der Planung sollten daher auch der Austausch oder der Rückbau der verklebten Elemente betrachtet werden. Ohnehin ist die planmäßige Lebensdauer von Vorhangfassaden geringer als die der Rohbaukonstruktion. Schäden am Glas können durch unerwartete Einwirkungen wie Vandalismus oder außergewöhnliche Naturereignisse auftreten. Ein Austausch von Verglasungen zu Reparaturzwecken sollte daher möglich sein.

Für einen reibungsarmen Bauablauf empfiehlt es sich, dass der Bauherr die Zustimmung für die ungeregelte Bauart in einer frühen Planungsphase einholt. Zusätzliche Anforderungen, die sich aus dem Genehmigungsverfahren ergeben, können so bereits bei der Ausschreibung berücksichtigt werden und verändern nicht nachträglich die Aufgabenstellung für das ausführende Unternehmen. Zeitlicher und finanzieller Aufwand für möglicherweise notwendige experimentelle Untersuchungen sollten im Termin- und Kostenplan berücksichtigt sein. Letztendlich gelingt eine innovative Konstruktion nur – und das gilt nicht nur für das Kleben – wenn alle Beteiligten eng miteinander kooperieren und gemeinsam den Willen aufbringen, neue Wege zu beschreiten.

4 Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf aussteifende Holz-Glas-Verbundtragwerke

4.1 Aussteifung von Holzbauten

Auf Hochbauten wirken Horizontalkräfte, die aus der Windanströmung und aus Abtriebskräften infolge einer unplanmäßigen Schiefstellung der vertikal lastabtragenden Bauteile resultieren. Diese Horizontalkräfte werden über die Decken an die Wandscheiben oder die Vertikalverbände des Aussteifungssystems übertragen, die dann die Kräfte sicher in die Gründung des Bauwerks ableiten. Mit der Holz-Glas-Verbundbauweise soll potenziell die Fassadenverglasung zum Aussteifen von Tragwerken genutzt werden. Bild 35 zeigt ein Gebäude, bei dem hinter der Giebelverglasung ein Aussteifungsverband angeordnet ist. Bei Ausnutzung der Tragwirkung der Verglasung in Scheibenebene könnte auf die gekreuzten Zugstäbe gegebenenfalls verzichtet werden.



Bild 35

Wohn- und Geschäftshaus in Kassel (D). Das Tragwerk besteht zum Teil aus Holz. Das Gebäude ist auf konventionelle Weise durch Verbände und Wandscheiben ausgesteift. Hinter der giebelseitigen Verglasung liegt klar erkennbar ein Aussteifungsverband aus gekreuzten Zugstäben.

Architekten: Stein Hemmes
Wirtz

Foto: Linda Blatzek

Skelettbauten aus Holz werden in der Regel durch Verbände oder einen tragenden Kern ausgesteift. Bei der Holztafelbauweise werden dagegen die aus Beplankung und Holzrahmen zusammengesetzten Wandscheiben zur Gebäudeaussteifung genutzt. In ähnlicher Weise lassen sich Gebäude in Holzmassivbauweise stabilisieren. Die Wandscheiben bestehen hier aus massiven Brettsperrholztafeln (Kreuzlagenholz) aus kreuzweise verleimten Brettern. Alle Aussteifungssysteme mit Wandscheiben haben gemein, dass die resultierende Zugkraft am Wandfuß rückverankert werden muss. Zuganker und Schubwinkel an der Schnittstelle zwischen

Wand und Decke weisen häufig eine größere Nachgiebigkeit als die Wandscheibe selbst auf und können daher bei der Berechnung nicht als starr angesehen werden.

Die individuelle Steifigkeit der tragenden Bauteile und die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel bestimmen, wie sich die Lasten in komplexen Tragstrukturen verteilen. Eine Integration der Holz-Glas-Verbundelemente in Aussteifungssysteme erfordert deshalb eine sorgsame Tragwerks- und Beanspruchungsanalyse. Die horizontalen Einwirkungen auf ein Gebäude verteilen sich bei Annahme starrer Deckenscheiben nach dem Steifigkeitsverhältnis auf die einzelnen Wandscheiben. Die Nachgiebigkeit der Klebverbindung bestimmt daher maßgeblich, welche Beanspruchung ein Holz-Glas-Verbundelement erfährt, das zur Gebäudeaussteifung herangezogen wird. Anhand einer Parameterstudie soll der Einfluss der Klebstoffsteifigkeit beurteilt und Rückschlüsse für die Klebstoffauswahl in Kapitel 5 gezogen werden.

4.2 Berechnungsverfahren

4.2.1 Begründung der Auswahl der Verfahren

Auf Wandtafeln basierende Aussteifungssysteme im Holzbau lassen sich nicht, wie beispielsweise im Stahlbetonbau üblich, zu einem elastischen und homogenen Ersatzstab zusammenfassen.¹³⁹ Der Grund hierfür liegt in Diskontinuitäten, die sich aufgrund der nachgiebigen Anschlüsse der Wandscheiben an die Decke oder von Wand zu Wand ergeben. Das Aussteifungssystem muss daher als räumliches Tragwerk betrachtet werden, wenn eine sehr genaue Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens erforderlich wird. Die Aussteifung von mehrgeschossigen Gebäuden in Holztafelbauart kann dazu beispielsweise an dreidimensionalen Finite-Elemente-Modellen untersucht werden.¹⁴⁰ Eine solch detaillierte Abbildung des Tragwerks ist äußerst komplex und für die hier geführte Parameterstudie unverhältnismäßig

¹³⁹ Im Stahlbetonbau wird die räumliche Tragstruktur des Aussteifungssystems häufig als Kragträger abstrahiert. Der Kragträger wird als homogener Stab mit dünnwandigem Querschnitt unter Torsions- und Biegebeanspruchung behandelt. (Vergleiche Kammer 2006, S. 11.)

¹⁴⁰ Die numerische Modellierung von Wandtafeln und die Berechnung von räumlichen Tragwerken in Holztafelbauweise wird u. a. bei Kammer (2006, S. 42 ff. und S. 59 ff.) gezeigt.

aufwendig. Der Horizontallastanteil je Wandscheibe wird daher geschossweise auf Basis vereinfachter Berechnungsverfahren für Wandbauweisen im Holzbau bestimmt.

Bei der Steifigkeitsermittlung von Holztafeln wird nach dem Stand der Technik die Wandsteifigkeit als Reihenschaltung verschiedener linear elastischer Federn approximiert. Die jeweiligen Federkennwerte stehen dabei für die einzelnen Verformungsanteile infolge von Biegung, Schub und der Nachgiebigkeit der Wandanschlüsse.¹⁴¹

Die Verformungen eines Holz-Glas-Verbundelements und die Beanspruchungen in den einzelnen Komponenten können an numerischen Modellen oder auch mit analytischen Verfahren bestimmt werden. Für die hier geführte parametrisierte Tragwerksanalyse werden lineare Federmodelle auf Basis der Schubfeldtheorie genutzt. Diese Verfahren werden als geeignet angesehen, um die Verteilung der Horizontalkräfte auf die einzelnen Wandscheiben des Aussteifungssystems hinreichend genau abzuschätzen. Die Grundlagen für ein einfaches Berechnungsverfahren nach Kreuzinger (2005) und für eine detaillierte Berechnungsvariante von Hochhauser (2011) werden vorgestellt. Anschließend wird bewertet, inwieweit diese für nachgiebige bis steife Klebverbindungen anwendbar sind.

4.2.2 Verteilung von Horizontallasten auf die Wandscheiben eines Aussteifungssystems

Die Geschossdecken verteilen die auf ein Gebäude wirkenden Horizontalkräfte auf die aussteifenden, vertikalen Bauteile. Bei statisch unbestimmten Aussteifungssystemen lässt sich der Lastanteil auf die jeweilige Wandscheibe über deren Steifigkeit bestimmen, vorausgesetzt, die starren Deckentafeln lassen eine entsprechende Lastweiterleitung zu.¹⁴² Infolge der angreifenden Horizontalkraft verformt sich das Aussteifungssystem. Neben den Verschiebungen in die beiden Achsrichtungen der Deckenebene entsteht bei unsymmetrischen Aussteifungssystemen oder bei exzentrischem Lastangriff eine Verdrehung um den Schubmittelpunkt.

¹⁴¹ Vergleiche Steinmetz 1992, S. 6.

¹⁴² Decken aus großformatigen Holzwerkstoffen werden üblicherweise als ausreichend starr angesehen. (Vergleiche Steinmetz 1992, S. 4.)

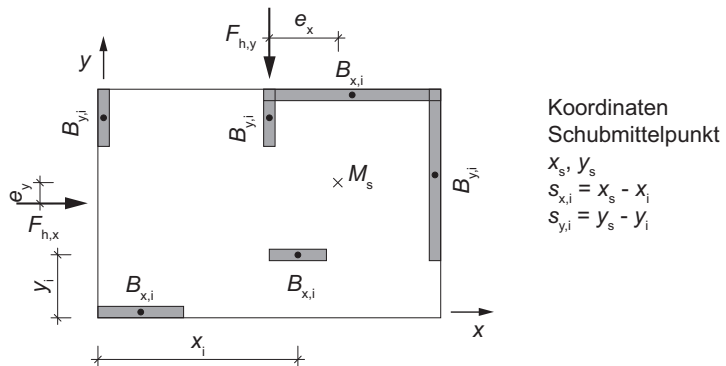
Am Kopfpunkt sind alle Wandscheiben über die starre Deckenplatte gekoppelt. Aus den Verträglichkeitsbedingungen der Translation und der Rotation leiten sich die Berechnungsformeln nach Gleichung 1 bis Gleichung 4 für die Lastanteile auf die Wände her. Das Berechnungsverfahren wird in der Literatur vielfältig beschrieben und für verschiedene Bauweisen angewendet.¹⁴³ Es gelten hierbei folgende Vereinfachungen und Annahmen:

- Der Wölb- und der Torsionswiderstand der einzelnen Wandelemente bleibt unberücksichtigt.
- In Querrichtung weisen die Wände keine Steifigkeit auf.
- Alle Wände haben die gleiche Höhe.
- Die Wände sind an ihren Kreuzungspunkten nicht miteinander gekoppelt.

Infolge einer Horizontalkraft in x-Richtung werden die einzelnen Wandscheiben wie folgt belastet. Die verwendeten Bezeichnungen und Definitionen zeigt Bild 36.

Bild 36

Bezeichnungen und geometrische Definitionen für die Berechnung des Horizontallastanteils auf orthogonal angeordneten Wandscheiben eines Geschosses nach Steinmetz (1992, S. 8).



Gleichung 1

$$F_{x,i} = \frac{F_{h,x} \cdot B_{x,i}}{\sum_k B_{x,k}} + \frac{F_{h,x} \cdot e_y \cdot B_{x,i} \cdot s_{y,i}}{\sum_k (B_{x,k} \cdot s_{y,k}^2) + \sum_k (B_{y,k} \cdot s_{x,k}^2)}$$

Gleichung 2

$$F_{y,i} = \frac{F_{h,x} \cdot e_y \cdot B_{y,i} \cdot s_{x,i}}{\sum_k (B_{x,k} \cdot s_{y,k}^2) + \sum_k (B_{y,k} \cdot s_{x,k}^2)}$$

¹⁴³ Für die Holztafelbauweise vergleiche Steinmetz 1992, S. 8. Für die Brettsperrholzbauweise vergleiche Wallner-Novak 2013, S. 132 ff.

Wirkt die Horizontalkraft in y-Richtung ergeben sich die Horizontalkräfte analog.

$$F_{x,i} = \frac{F_{h,y} \cdot e_x \cdot B_{x,i} \cdot s_{y,i}}{\sum_k (B_{x,k} \cdot s_{y,k}^2) + \sum_k (B_{y,k} \cdot s_{x,k}^2)}$$

Gleichung 3

$$F_{y,i} = \frac{F_{h,y} \cdot B_{y,i}}{\sum_k B_{y,k}} + \frac{F_{h,y} \cdot e_x \cdot B_{y,i} \cdot s_{x,i}}{\sum_k (B_{x,k} \cdot s_{y,k}^2) + \sum_k (B_{y,k} \cdot s_{x,k}^2)}$$

Gleichung 4

Die Steifigkeit einer Wandscheibe – hier mit B bezeichnet – hängt dabei vom Material, von der Geometrie und von der Konstruktionsweise ab.¹⁴⁴ Greift die Last außerhalb des Schubmittelpunkts des Aussteifungssystems (Exzentrizitäten e_x und e_y) an, verdreht sich die Deckenplatte. Die Wandscheiben erfahren durch diese Torsion eine zusätzliche Beanspruchung. Die Torsionsbeanspruchung aus einer geometrischen Exzentrizität kann durch einen außermittigen Lastangriff des Windes noch weiter verstärkt werden.

Wände, die parallel zur Wirkungsrichtung der Horizontalkraft angeordnet sind, erhalten einen Anteil aus Translation und einen Anteil aus Rotation der Deckenscheibe. Auf Wände, die senkrecht zur Wirkungsrichtung der Horizontalkraft stehen, wirken nur Kräfte infolge der Verdrehung.

4.2.3 Wandscheibe als Schubfeld

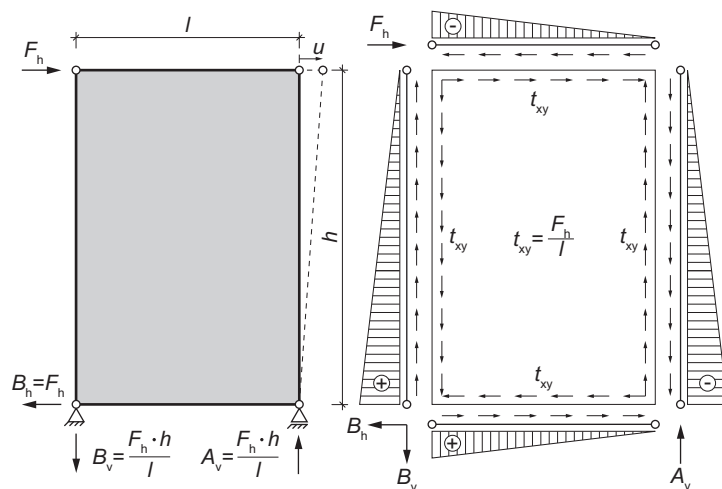
Die Bemessung von Wandscheiben in Holztafelbauweise nach Eurocode 5 basiert auf der Schubfeldtheorie.¹⁴⁵ Solange die Beplankung unter der einwirkenden Horizontalkraft eben bleibt und nicht infolge von Plattenbeulen versagt, kann die Tragwirkung von Holztafeln damit näherungsweise erfasst werden. Die Theorie setzt voraus, dass eine durchgängige Verbindung zwischen den Plattenrändern und den Randgliedern besteht. Bei Holztafeln sorgen dafür Nägel oder Klammern, die in regelmäßigem Abstand angeordnet sind. Wandartige Holz-Glas-Verbundelemente können auch als Schubfeld betrachtet werden. Durch die linienförmige Klebverbindung, den umlaufenden Holzrahmen und die starre Glasscheibe ist das Tragverhalten sehr ähnlich.

¹⁴⁴ Die Nachgiebigkeit von Brettsperrholz- und Holz-Glas-Verbundwänden wird beispielhaft in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 ermittelt.

¹⁴⁵ Vergleiche DIN EN 1995-1-1:2010-12, 9.2.4.

Schubfelder bestehen aus einer starren Platte und allseitig angebrachten Randprofilen. Diese Randglieder werden in der Theorie als biegestarr betrachtet und somit nur durch eine Längskraft beansprucht. Die Platte – in diesem Fall die Glasscheibe – überträgt nur Schubspannungen. Die stabförmigen Randglieder sind an den Ecken gelenkig miteinander verbunden. Ohne die Scheibe bilden die Randstäbe ein instabiles Stabwerk. Aus diesen Annahmen ergibt sich in der Verbindungsfuge ein konstanter Schubfluss t_{xy} , wenn die Wand am Kopf durch eine Horizontalkraft F_h belastet wird (Bild 37). Die Randglieder werden dementsprechend durch eine linear veränderliche Normalkraft N beansprucht.

Bild 37
Schnittkräfte und Verformungen an einer Wandscheibe nach der Schubfeldtheorie.¹⁴⁶



Die Schubfeldtheorie gilt nur unter der Voraussetzung, dass die Scheibe nicht durch Ausbeulen ausfällt und die Verbindungsfuge zuerst versagt. Verformungen, die sich aus der Nachgiebigkeit von Verbindungsmitteln zwischen benachbarten Elementen und der Verankerung der Wand am Fußpunkt ergeben, werden durch die Schubfeldtheorie nicht berücksichtigt und müssen gesondert erfasst werden, um wirklichkeitsnahe Verformungen bei mehrgeschossigen Gebäuden zu erhalten.¹⁴⁷

¹⁴⁶ Die Berechnung des Schubflusses in einem rechteckigen Schubfeld wird beispielsweise bei Klein (2011, S. 159 f.) beschrieben.

¹⁴⁷ Vergleiche Hall 2012, S. 5 ff.

4.2.4 Federmodelle

Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holz-Glas-Verbundelemente, das auf der Schubfeldtheorie basiert, wurde von Kreuzinger (2005) vorgeschlagen. Die Nachgiebigkeit der Klebverbindung wird dabei näherungsweise über zwei linear elastische Federn je Kante beschrieben (Bild 38). Diese Schubbettungen k_u und k_w wirken parallel beziehungsweise quer zur Klebfuge. Neben Schubkräften überträgt die Scheibe daher auch Zug- und Druckkräfte. In diesem Federmodell werden die Scheibe und die Randglieder als starr angesehen, da ein sehr nachgiebiges Verhalten des Klebstoffs im Vergleich zur Verglasung und zum Holzrahmen vorausgesetzt wird. Die Klebfuge verformt sich dann deutlich stärker als die restlichen Komponenten des Verbundelements.

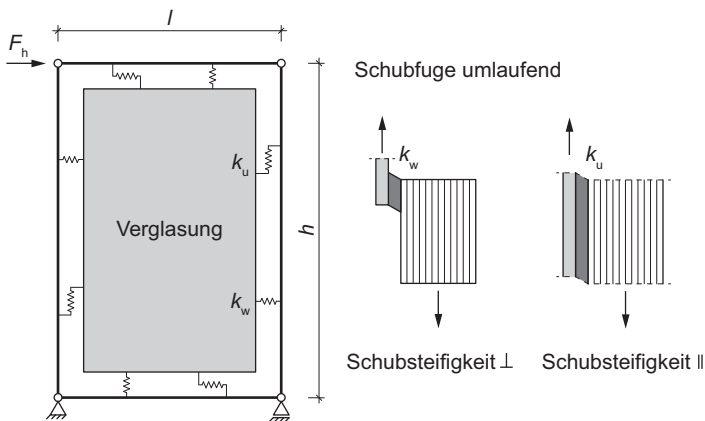


Bild 38

Einfaches Federmodell für die Berechnung von Holz-Glas-Verbundelementen mit nachgiebiger Klebverbindung nach Kreuzinger (2005, S. 3 f.).

Für dieses einfache Federmodell ergibt sich die Verschiebung des oberen Querriegels u aus der einwirkenden Horizontalkraft F_h nach Gleichung 5.¹⁴⁸

$$u = \frac{2F_h}{k_u l} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{k_w h}{k_u 3l}} + \frac{\frac{h}{l}}{1 + \frac{k_w l}{k_u 3h}} \right)$$

Gleichung 5

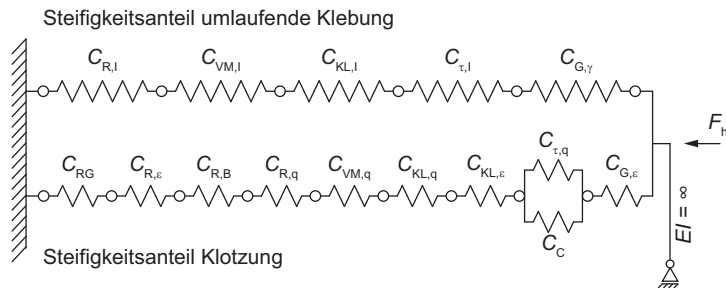
Die vereinfachten Annahmen gelten allerdings nicht für steifere Klebstoffe, da die Relativverschiebung in der Klebfuge im Vergleich zu nachgiebigen Systemen abnimmt. Die Verformungen der anderen Komponenten im Verbundelement

¹⁴⁸ Vergleiche Kreuzinger 2005, S. 6.

können daher nicht mehr vernachlässigt werden. Auf diesem Verfahren baut Hochhauser (2011a) auf und entwickelt ein detaillierteres Federmodell, das die Schubnachgiebigkeit der Randglieder, die Verformung der Glasscheibe und den Schlupf in der Schraubverbindung zwischen Koppelleiste und Unterkonstruktion erfasst. Bei diesem Modell werden zwei Tragmechanismen – die Verglasung als Schubfeld und die Druckdiagonale in der Glasscheibe – miteinander kombiniert.¹⁴⁹ Die Druckdiagonale wird aktiviert, wenn zusätzlich zur umlaufenden Klebung Klotzungen zum Abtrag der Horizontalkräfte verwendet werden. Zwei parallel geschaltete Federn erfassen die Steifigkeit eines solchen kombinierten Systems (Bild 39). Die individuelle Nachgiebigkeit der Komponenten wird über in Reihe gekoppelten Federelemente abgebildet.

Bild 39

Prinzip des detaillierten Federmodells für die Berechnung von Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise mit umlaufender Klebverbindung und zusätzlicher Verklotzung nach Hochhauser (2011a, S. 222).



Werden Holz und Glas allein durch die umlaufende Klebung verbunden, entfällt die Federkombination für die Klotzung. Der äquivalente Steifigkeitsanteil für das Schubfeld beträgt unter Berücksichtigung der Reihenschaltung der Einzelsteifigkeiten im Verbundelement:

Gleichung 6

$$C_{\tau, \text{äq}} = \left(\frac{1}{C_{\tau, I}} + \frac{1}{C_{KL, I}} + \frac{1}{C_{VM, I}} + \frac{1}{C_{R, I}} + \frac{1}{C_{G, \gamma}} \right)^{-1}$$

Die jeweilige Verzerrung der Bestandteile des Verbundelements infolge des Schubflusses wird durch folgende lineare Federkonstanten erfasst.¹⁵⁰

¹⁴⁹ Vergleiche Hochhauser 2011a, S. 203 f.

¹⁵⁰ Die wichtigsten Berechnungsformeln des erweiterten Federmodells nach Hochhauser (2011a, S. 206 ff.) werden zum besseren Verständnis nachfolgend wiedergegeben (Gleichung 6 bis Gleichung 12). Die Bezeichnungen werden dabei weitestgehend übernommen.

$C_{\tau,l}$	Klebfuge
$C_{KL,l}$	Koppelleiste
$C_{VM,l}$	Schrauben zwischen Koppelleiste und Rahmen
$C_{R,l}$	Rahmen
$C_{G,\gamma}$	Verglasung

Bild 40 zeigt die zugehörigen Geometrieangaben und Bezeichnungen.

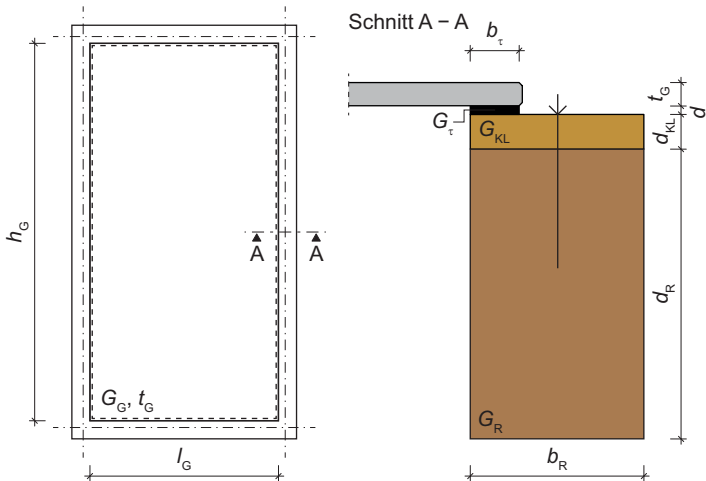


Bild 40
Bezeichnungen und Geometrieangaben für die Berechnung der Federsteifigkeiten in einer Wandscheibe mit umlaufender Klebung zwischen Glas und einer Koppelleiste aus Holz. Die Koppelleiste wird mit dem Holzrahmen verschraubt.

Die Schubsteifigkeit der Klebfuge in Längsrichtung ergibt sich aus dem Schubmodul des Klebstoffs und dem Klebfugenquerschnitt.

$$C_{\tau,l} = \frac{G_{\tau} \cdot b_{\tau}}{d_{\tau}}$$

Gleichung 7

Die Schubsteifigkeit der Koppelleiste in Stablängsrichtung beträgt:

$$C_{KL,l} = \frac{G_{KL} \cdot b_{KL}}{d_{KL}}$$

Gleichung 8

Die Verformungen an der Schnittstelle zwischen Koppelleiste und Unterkonstruktion resultieren aus der Nachgiebigkeit der Schraubverbindung. Die zugehörige Federkonstante berechnet sich nach Gleichung 9. Neben dem Abstand und dem Durchmesser der Schrauben beeinflusst die Rohdichte der verbundenen Holzwerkstoffe die Steifigkeit.

Gleichung 9

$$C_{VM,l} = m \cdot K_{ser} = \frac{n}{l} \cdot \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d_{VM}}{23}$$

m	Anzahl der Verbindungsmittel je Längeneinheit
K_{ser}	Verschiebungsmodul für stiftförmige Verbindungsmittel gemäß DIN EN 1995-1-1, 7.1
n	Anzahl der Verbindungsmittel im betrachteten Fugenabschnitt
l	Länge des betrachteten Fugenabschnitts
d_{VM}	Durchmesser der Verbindungsmittel
ρ_m	Rohdichte des miteinander verbundenen Holzes bzw. Holzwerkstoffs

Der Einfluss des Rahmens in Längsrichtung wird analog zu Gleichung 7 und Gleichung 8 aus dem Schubmodul und den Abmessungen des Holzquerschnitts bestimmt.

Gleichung 10

$$C_{R,l} = \frac{G_R \cdot b_R}{d_R}$$

Die Schubverzerrung der in Scheibenebene beanspruchten Verglasung wird über die Federsteifigkeit in Gleichung 11 berücksichtigt.

Gleichung 11

$$C_{G,\gamma} = \frac{2 \cdot G_G \cdot t_G}{h_G} \cdot \left(1 + \frac{h_G}{l_G} \right)$$

Die Wandsteifigkeit eines Holz-Glas-Verbundelements mit umlaufender Schubverklebung lässt sich bei näherungsweise Annahme eines linear elastischen Verhaltens aus dem Verhältnis von einwirkender Horizontalkraft zu resultierender Kopfverschiebung berechnen. Wird die gleiche Nachgiebigkeit senkrecht und längs zur Klebfuge ($k_u = k_w = C_{\tau, \text{äq}}$) angenommen, ergibt sich die Wandsteifigkeit durch das Umstellen von Gleichung 5.

Gleichung 12

$$K_{\tau} = \frac{F_h}{u} = \left[\frac{2}{C_{\tau, \text{äq}} \cdot l_G} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{h_G}{3l_G}} + \frac{\frac{h_G}{l_G}}{1 + \frac{l_G}{3h_G}} \right) \right]^{-1}$$

4.3 Randbedingungen für die Analyse

4.3.1 Modellgebäude

Das Zusammenspiel von Holz-Glas-Verbundelementen mit den anderen Bauteilen des Tragwerks wird am Beispiel eines Modellgebäudes (Bild 41) analysiert. Die Lastverteilung auf die Wandscheiben und Holz-Glas-Verbundelemente erfolgt für das Regelgeschoss. Die wesentlichen Parameter der Studie sind die Nachgiebigkeit der Klebverbindung und die Anordnung der aussteifenden Wandscheiben.

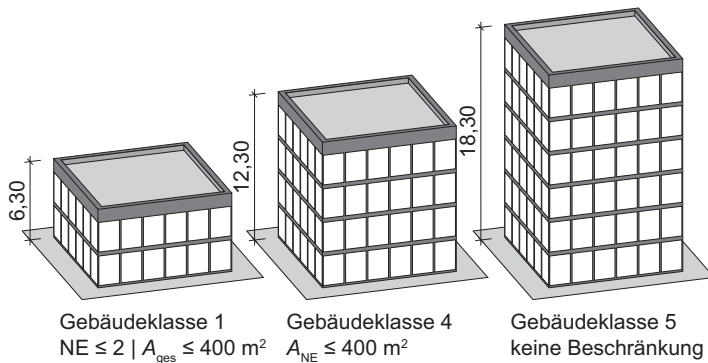


Bild 41

Modellgebäude mit variierender Geschossanzahl. Abhängig von der Höhe, der Anzahl der Nutzungseinheiten (NE) und deren Fläche (A_{ges} , A_{NE}) sind die Varianten den Gebäudeklassen nach §2 (3) MBO zugeordnet.

Musterstatiken für ein- und zweigeschossige Gebäude¹⁵¹ zeigen, dass die Einsatzgrenze von Holz-Glas-Verbundelementen mit nachgiebiger Silikonklebung bereits von Gebäuden in der Größe eines Einfamilienhauses markiert wird. Von steiferen Klebstoffen wird grundsätzlich eine Verbesserung der Tragfähigkeit und eine Vergrößerung dieses Anwendungsspektrums erwartet. Die hier geführte Analyse umfasst daher auch Gebäude mit mehr als zwei Geschossen. Wegen der hohen Brandschutzanforderungen existieren bisher allerdings nur wenige mehrgeschossige Holzbauwerke. Die Obergrenze liegt bei vier bis sechs Geschossen, abhängig von den Vorschriften des jeweiligen Landes.¹⁵² Mit der Renaissance, die der Holzbau gerade wegen seiner

¹⁵¹ Vergleiche Neubauer 2011, S. 200 f.

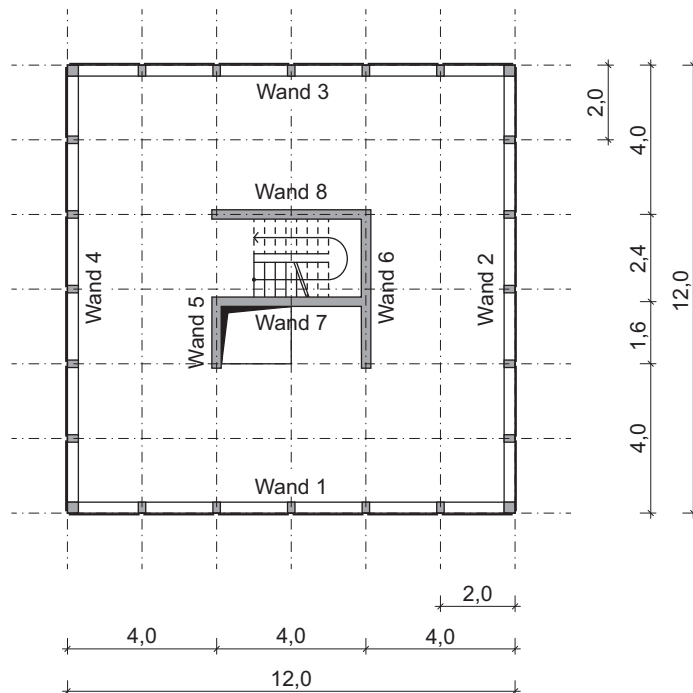
¹⁵² In Deutschland gilt (§ 27 MBO), dass tragende Wände und Stützen ab Gebäudeklasse 4 hochfeuerhemmend ausgebildet werden müssen. Holzbauwerke werden dazu komplett mit einem nicht brennbaren Material gekapselt, das eine Entzündung über mindestens 60 Minuten verhindert (M-HFHolzR 3.2). Ab Gebäudeklasse 5 muss das Tragwerk feuerbeständig sein. Reine Holztragwerke sind dann nicht mehr bzw. nur mit einem individuellen Brandschutzkonzept realisierbar.

Nachhaltigkeit erlebt, stoßen Architekten aber schon in Bereiche jenseits dieser Grenze vor.¹⁵³ Die getroffene Auswahl deckt somit ein für den Holzbau relevantes Spektrum ab.

Das frei stehende Gebäude hat einen quadratischen Grundriss mit einer Fläche von 12,0 m x 12,0 m (Bild 42). Die Geschosse haben eine Höhe von jeweils 3,0 m. Im Gebäudeinneren befindet sich ein zentraler Kern mit einer Treppe und einem Aufzug zur Erschließung des Gebäudes. Die restlichen Flächen können frei mit nicht tragenden Trennwänden unterteilt oder auch offen gestaltet werden. Die Nutzung soll nicht näher definiert sein. Die Kubatur und Flächenverteilung sind allerdings typisch für Büro- oder Wohngebäude.

Bild 42

Grundriss eines Regelgeschosses. Die grau hinterlegten Flächen markieren die vertikalen Tragglieder, auf denen die Decken aus Brettsper Holz gelagert sind. Die Spannweite zwischen den Außenstützen und den Wänden des Erschließungskerns beträgt etwa 4,0 m.¹⁵⁴



¹⁵³ Ein Beispiel für diese Entwicklung ist ein achtgeschossiges Bürogebäude in Dornbirn (A). Das Bausystem LifeCycle Tower, auf dem dieser Pilotbau basiert, erlaubt theoretisch Gebäude in Holz-Hybridbauweise mit bis zu 20 Geschossen. (Vergleiche Kaufmann 2012, S. 48 f.)

¹⁵⁴ Die Gebäudestruktur und die Grundrisse der Regelgeschosse wurden im Rahmen einer Diplomarbeit (Seeger 2015) entwickelt und die wesentlichen Bauteile des Modellgebäudes vordimensioniert. Die in diesem Kapitel geführte Parameterstudie zum Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf die Lastverteilung im Aussteifungssystem baut darauf auf. Die wesentlichen Rahmenbedingungen sowie die gewählten Decken- und Wandaufbauten werden übernommen.

Das Tragwerk des Gebäudes besteht überwiegend aus Holz. Für die tragenden Innenwände des Bauwerkskerns und die Decken werden Massivholzplatten aus Brettspertholz verwendet. Stützen aus Brettschichtholz befinden sich an der Außenwand. Die Fassade ist komplett verglast.¹⁵⁵ Teile der Verglasung sollen zur Aussteifung des Gebäudes herangezogen werden. Jede Fassadenseite wird dazu in sechs gleiche Elemente unterteilt. Die Abmessungen der Holz-Glas-Verbundelemente betragen dann 2,0 m x 3,0 m. Die Vertikalkräfte werden über Stützen in der Außenwand und die Wände im Gebäudeinneren abgetragen.

Zwei grundlegende Varianten zur Gebäudeaussteifung des Modellgebäudes werden näher untersucht. Bei Variante 1 stabilisieren ausschließlich Holz-Glas-Verbundelemente die Tragstruktur des Modellgebäudes. Bei Variante 2 werden dagegen ein zentraler Kern aus Brettspertholztafeln und Holz-Glas-Verbundelemente in der Außenfassade zu einem gemeinsam wirkenden Aussteifungssystem kombiniert.

4.3.2 Konstruktive Gestaltung

Das Gebäude weist, wie für zeitgemäße Holzbauten typisch, einen hohen Vorfertigungsgrad auf. Die Decken- und Wandelemente werden werkseitig abgebunden und in der Produktionsstätte mit einem hohen Ausbaugrad vormontiert. Nach dem Zusammensetzen auf der Baustelle müssen die Elemente fest miteinander verbunden werden. Um Deckenelemente aus Brettspertholz an eine darunterliegende Wand aus dem gleichen Material anzuschließen, werden entweder Winkelverbinder entlang der Fuge angeordnet, die Kantflächen miteinander verschraubt oder werkseitig eingeklebte Gewindestangen genutzt.¹⁵⁶ Die Nachgiebigkeit dieses Anschlusses wirkt sich auf die Gesamtsteifigkeit der Wand aus und muss bei der Berechnung des Horizontallastanteils auf die Wand berücksichtigt werden.

¹⁵⁵ Ästhetische Gesichtspunkte und bauphysikalische Anforderungen sowie Belange des Wärme- und Sonnenschutzes wurden bei der Definition des Modellgebäudes nicht berücksichtigt, da ausschließlich das Tragsystem betrachtet werden soll.

¹⁵⁶ Vergleiche Schickhofer 2010, S. E-4 f.

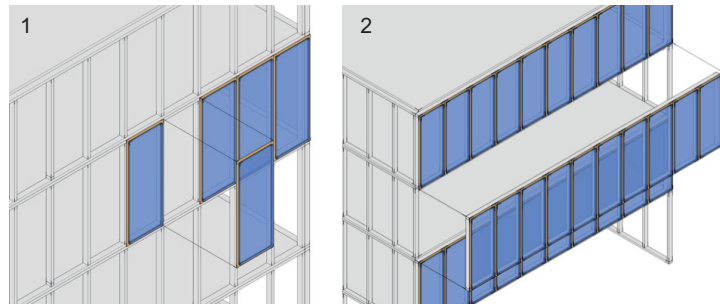
Die Holz-Glas-Verbundelemente kommen fertig verklebt aus dem Werk. Für die Endmontage ergeben sich daraus verschiedene Möglichkeiten der Vorfertigung (Bild 43).

Bild 43

Vorfertigungsvarianten der Verbundfassade nach Nicklisch (2015b, S. 378).

- 1 Verschrauben mit der Holzunterkonstruktion auf der Baustelle
- 2 Vorfertigung ganzer Wandelemente

Grafik: Gump & Maier GmbH



Einerseits kann die Unterkonstruktion der Fassade auf der Baustelle errichtet und das mit einer umlaufenden Koppel- leiste versehene Verglasungselement vor Ort mit den Pfosten- und Riegelementen verschraubt werden (Variante A). Andererseits bietet sich auch die Möglichkeit, größere Wand- abschnitte vorzufertigen, die aus mehreren Holz-Glas-Ver- bundverglasungen bestehen (Variante B). Die einzelnen Verglasungen besitzen auch bei dieser Variante umlaufende Koppel- leisten als Anschlusselement, um einen individuellen Austausch von beschädigten Gläsern zuzulassen.

In beiden Fällen wird ein Anschluss der Fassadenunterkon- struktion an die Deckenplatten notwendig. Für diese Schnitt- stellen existieren noch keine Standarddetails, sodass sich eine Grenzwertbetrachtung zwischen starrer und nachgiebi- ger Verbindungsfuge empfiehlt.

4.3.3 Lastannahmen

Die aussteifenden Bauteile eines Gebäudes werden durch Horizontalkräfte aus Wind und aus Bauwerksimperfectionen beansprucht. Der maßgebliche Anteil ergibt sich aus dem Wind. Infolge der Anströmung der Gebäudehülle entstehen Druck- und Sogkräfte, die senkrecht auf die Oberfläche der Fassade wirken (Bild 44). Der Geschwindigkeitsdruck der vorherrschenden Windströmung ergibt sich aus der Wind- zone, der Rauigkeit des umgebenden Geländes sowie der Höhe des angeströmten Bauwerks über dem Boden. Dieser Druck wird mit einem aerodynamischen Beiwert multipliziert, der die Druck- und Sogbereiche sowie den Einfluss der Bau- teilgröße berücksichtigt. Für Gebäude mit rechteckigem

Grundriss können die Beiwerte der DIN EN 1991-1-4 und dem nationalen Anhang¹⁵⁷ entnommen werden. Wegen des geringfügigen Einflusses wird eine außermittige Windeinwirkung nicht berücksichtigt.¹⁵⁸

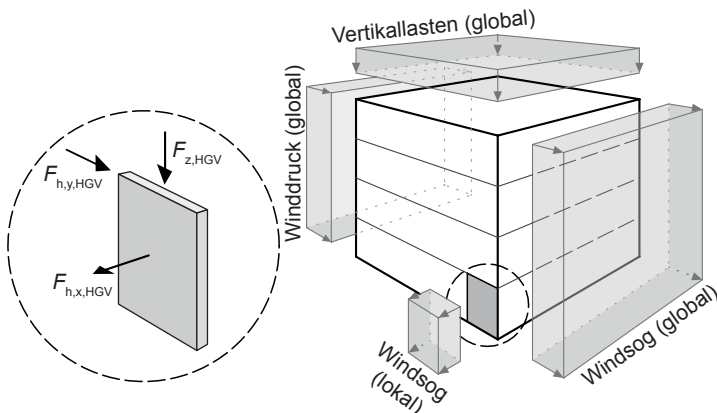


Bild 44

Einwirkungen auf das Modellgebäude nach Seeger (2015, S. 41). Zusätzlich zu den globalen Vertikal- und Horizontalkräften, die sich aus Wind-, Schnee-, Nutz- und Eigenlasten ergeben, wirken lokal Kräfte senkrecht zur Scheibenebene der Verglasung (z. B. Windsog und -druck, Klimlast, horizontale Nutzlast und Stoßbeanspruchung aus Personenanprall).

Ein weiterer Teil der Horizontalkräfte auf das Aussteifungssystem resultiert aus baupraktisch unvermeidbaren Imperfektionen, die zu einer Schrägstellung von Bauteilen führen. Die Vertikallasten wirken somit nicht in einer ideal ausgerichteten Kette von vertikalen Tragelementen, sondern erzeugen an den Verbindungspunkten horizontale Abtriebskräfte. Die Auswirkungen von Imperfektionen bei vertikal beanspruchten Wänden können durch eine horizontale Ersatzlast berücksichtigt werden, die 1/70 der über die gesamte Wandlänge wirkenden Vertikalkraft beträgt.¹⁵⁹ Darüber hinaus können Erdbeben die aussteifenden Bauteile signifikant beanspruchen. Auswirkungen aus dieser Lastart werden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht.

Die horizontalen und vertikalen Lasten summieren sich im Gebäude von oben nach unten. Die maßgebende Horizontalkraft wirkt daher auf die Decke über dem Erdgeschoss. In

¹⁵⁷ Vergleiche DIN 1991-1-4/NA:2010-12, 7.2.2.

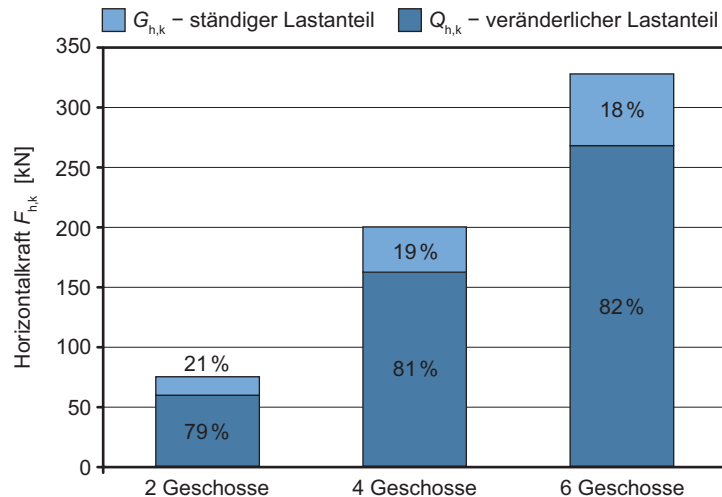
¹⁵⁸ Wird die Bauwerksoberfläche im Winkel angeströmt, entsteht eine exzentrische Windbelastung (DIN EN 1991-1-4:2010-12, 7.1.2), die zu einer Torsion des Gebäudes führen kann. Die daraus resultierende Horizontalkraft beträgt jedoch nur etwa 70 % der Windlast bei senkrechter Anströmung. In der Regel wird daher nur der Lastfall Vollast mit geometrischer Exzentrizität maßgebend. (Vergleiche Colling 2012, S. 20.)

¹⁵⁹ Vergleiche DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, NCL zu 9.2.4.2.

dieser Ebene werden die Holz-Glas-Verbundelemente am stärksten beansprucht. Bild 45 zeigt die überschlägig am Modellgebäude ermittelte horizontale Belastung des Aussteifungssystems für drei unterschiedliche Gebäudehöhen. Das Verhältnis von ständigen zu veränderlichen Lastanteilen ist in Prozent angegeben. Wegen des quadratischen Grundrisses und der symmetrischen Gebäudestruktur ergeben sich gleiche Kräfte für die x- und für die y-Richtung.¹⁶⁰

Bild 45

Charakteristische Horizontalkraft $F_{h,k}$ auf die Deckenplatte über der untersten Geschossebene des Modellgebäudes nach Seeger (2015, S. 52).



Für die zweigeschossige Variante ergibt sich eine Horizontalkraft auf die Gesamtheit der aussteifenden Bauteile in der Erdgeschosebene in Höhe von etwa 75 kN. Bei vier Geschossen beträgt die Kraft etwa 200 kN und bei sechs etwa 325 kN. Die Horizontalkraft wächst nicht direkt proportional zur Geschossanzahl, da die Windlast nicht gleichmäßig mit der Höhe zunimmt. Das Verhältnis zwischen Beanspruchungen mit ständiger und mit veränderlicher Wirkungsdauer beträgt unabhängig von der Gebäudehöhe etwa 1 zu 5.

¹⁶⁰ Die Lasten wurden in einer Diplomarbeit (Seeger 2015) zusammengestellt und werden hier nur auszugsweise wiedergegeben. Die Lastermittlung basiert auf folgenden Annahmen:

- Nutzungskategorie B3 (DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12, Tab. 6.1DE)
- Schneelastzone 1a (DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12, Bild NA.1)
- Gebäudestandort 420 m ü. NN
- Windzone 1, Binnenland (DIN EN 1991-1-4/NA: 2010-12, Tab. NA.B.3).

4.4 Parameterstudie

4.4.1 Nachgiebigkeit der Kernwände

Für Brettsperrholzwände ergibt sich die Gesamtsteifigkeit aus dem Biege- und Schubanteil der aussteifenden Wandscheibe sowie der Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel am oberen und unteren Deckenanschluss der Wand.¹⁶¹

$$B_{\text{BSP}} = \left(\frac{h^3}{3 \cdot EI} + \frac{h}{GA_s} + \frac{h^2}{b^2 \cdot C_z} + \frac{2}{C_F} \right)^{-1}$$

Gleichung 13

h, b Höhe und Breite der Brettsperrholztafel

EI Biegesteifigkeit der Wand¹⁶²

GA_s Schubsteifigkeit der Wand¹⁶³

C_z Steifigkeit des Zugankers

C_F Schubsteifigkeit der Fuge Wand-Decke

Die Wände des Aussteifungskerns im Modellgebäude bestehen aus fünflagigem Brettsperrholz mit Decklage in Plattenquerrichtung. Die vertikal verlaufenden Lamellen haben eine Dicke von je 30 mm. Die horizontalen Lamellen sind 19 mm dick. Die Biege- und Schubsteifigkeit der Wand wird aus folgenden Kennwerten berechnet.¹⁶⁴

Wandhöhe	$h = 3,0 \text{ m}$
Gesamtdicke des Elements	$d = 128 \text{ mm}$
Nettoquerschnitt Biegung	$d_{0,\text{net}} = 90 \text{ mm}$
E-Modul parallel zur Faser	$E_{0,\text{mean}} = 12.000 \text{ N/mm}^2$
Schubmodul	$G = 500 \text{ N/mm}^2$

¹⁶¹ Vergleiche Wallner-Novak 2013, S. 134 f.

¹⁶² Das Flächenträgheitsmoment wird nur für die in Tragrichtung verlaufenden Lamellen (vertikal) bestimmt.

¹⁶³ Die Schubsteifigkeit einer Wandscheibe aus Brettsperrholz ist, bedingt durch Risse zwischen den einzelnen Lamellen, geringer als die des Grundmaterials. Bei der Berechnung der Schubsteifigkeit wird daher ein effektiver Schubmodul G angesetzt, der auf den Bruttoquerschnitt $A_s = b \cdot d$ bezogen wird. Für fünflagige Brettsperrholzelemente beträgt $G \approx 0,70 \cdot G_{0,\text{mean}}$ (Vergleiche Schickhofer 2010, S. D-122 f.)

¹⁶⁴ Standardplatte aus Kreuzlagenholz (KLH) 5s DQ, Nenndicke 128 mm mit Lamellenaufbau 30/19/30/19/30 [mm]. Die Materialkennwerte wurden der Zulassung ETA-06/0138 entnommen.

Die Wände werden mittels Winkelverbindern angeschlossen, die im Abstand von 1,0 m mit den Holzdecken verschraubt sind. Auf eine detaillierte Ermittlung der Nachgiebigkeit für dieser Verbindung wird an dieser Stelle verzichtet und ein geeigneter Wert angenommen.¹⁶⁵ Tafel 2 fasst die Berechnungsergebnisse für die im Modellgebäude vorgesehenen Wände des Aussteifungskerns zusammen.

Tafel 2

Wandsteifigkeiten der Kernwände aus Brettsperrholz. Die Wandbezeichnung kann Bild 42 entnommen werden. Die Schubbeanspruchung übertragen alle Winkel, mit denen das Element befestigt ist. Auf Zug wird nur der äußere Winkel wirksam.

Wand Nr.	B [m]	EI [MNm ²]	GA _s [MN]	C _F [N/mm]	C _Z [N/mm]	B _{BSP} [N/mm]
5	1,6	368,6	102,4	16.000	8.000	1.618
6, 7, 8	4,0	5.760,0	256,0	32.000	8.000	6.845

4.4.2 Nachgiebigkeit eines Verbundelements

Für ein Holz-Glas-Verbundelement aus der Fassade des Modellgebäudes wird mit den in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Federmodellen von Kreuzinger und von Hochhauser die Kopfverschiebung berechnet. Dabei wird die Schubsteifigkeit der Klebverbindung variiert, um den Einfluss des Klebstoffs auf das Tragverhalten näher zu untersuchen. Das Element hat eine Größe von 2,0 x 3,0 m. Tafel 3 zeigt die bei der Berechnung berücksichtigten Abmessungen und die daraus resultierenden Federsteifigkeiten für die einzelnen Komponenten nach Gleichung 7 bis Gleichung 11. Für die Berechnung der Nachgiebigkeit der Verbindungsfuge muss zusätzlich noch die kombinierte Rohdichte aus den zwei miteinander verbundenen Materialien nach Gleichung 14 bestimmt werden.¹⁶⁶ Die Koppelleiste besteht aus Birkensperrholz, die Unterkonstruktion aus Brettschichtholz.

Gleichung 14

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \cdot \rho_{m,2}} \quad \rho_m = \sqrt{380 \cdot 680} = 508 \text{ kg/m}^3$$

¹⁶⁵ Die Schub- und Zugsteifigkeit von Winkelverbindern kann im Detail aus den einzelnen Verformungsanteilen des Stahlwinkels und der Verbindungsmittel bestimmt werden. Die Schubsteifigkeit eines solchen Winkels liegt in der Regel über dessen Zugsteifigkeit. Detaillierte Berechnungsbeispiele finden sich bei Schickhofer (2010, S. G-2 ff.) oder bei Kammer (2006, S. 51 ff.). Darauf basierend werden hier näherungsweise sowohl die Zug- als auch die Schubsteifigkeit eines Winkelverbinders mit 8000 N/mm angenommen.

¹⁶⁶ Vergleiche DIN EN 1995-1-1:2010-08 7.1 (2).

Komponente	Index	G [N/mm ²]	b [mm]	d [mm]	C_1 [kN/cm]
Klebfuge	τ	variabel	12	3	variabel
Koppelleiste	KL	185	80	18	82,2
Rahmen	R	720	80	160	24,0
Glas	G	28455	1904 x 2904 mm mit $t_G = 8$ mm		39,6
Schrauben	VM	$d_{VM} = 6$ mm Abstand 100 mm			3,1

Tafel 3

Eingangswerte und berechnete Federsteifigkeit in Längsrichtung für die Komponenten des HGV-Elements. Die Bezeichnungen beziehen sich auf die Angaben in Bild 40.

G Schubmodul

b Querschnittsbreite

d Querschnittsdicke

C Federsteifigkeit

Das Element wird am Kopf mit einer Horizontalkraft von 5 kN belastet. Das entspricht näherungsweise der Last auf eine aussteifende Wand in einem zweigeschossigen Gebäude.¹⁶⁷ Bild 46 zeigt die Ergebnisse der Berechnung. Bei geringer Steifigkeit der Klebverbindung liefern beide Modelle ähnliche Ergebnisse. Mit wachsender Steifigkeit differieren die berechneten Verformungen allerdings deutlicher, wobei mit dem einfachen Federmodell die Gesamtverformungen unterschätzt werden, da dieses nur die Nachgiebigkeit der Klebfuge erfasst. Bei einem Schubmodul des Klebstoffs von 10 N/mm² liegt die Abweichung zwischen beiden Verfahren bereits bei über 60 %. Die anhand des detaillierten Federmodells berechnete Kopfverschiebung tendiert mit steigender Klebschichtsteifigkeit gegen einen Grenzwert, der sich aus der Nachgiebigkeit der weiteren Komponenten im Verbund ergibt. Die Kurve zum vereinfachten Verfahren strebt gegen null, da die Randglieder als starr angesetzt werden.

Das einfache Berechnungsverfahren eignet sich daher nur für Klebfugen aus Silikon oder aus ähnlich nachgiebigen Klebstoffen. Der Schubmodul typischer Silikonklebstoffe für Fassaden liegt bei etwa 0,5 N/mm².¹⁶⁸ Unter der aufgetragenen Horizontalkraft stellt sich dann eine Kopfverschiebung von knapp über 5 mm ein. Der Grenzwert liegt bei 6 mm, da die Horizontalverschiebung am Kopf auf $l/500$ begrenzt sein

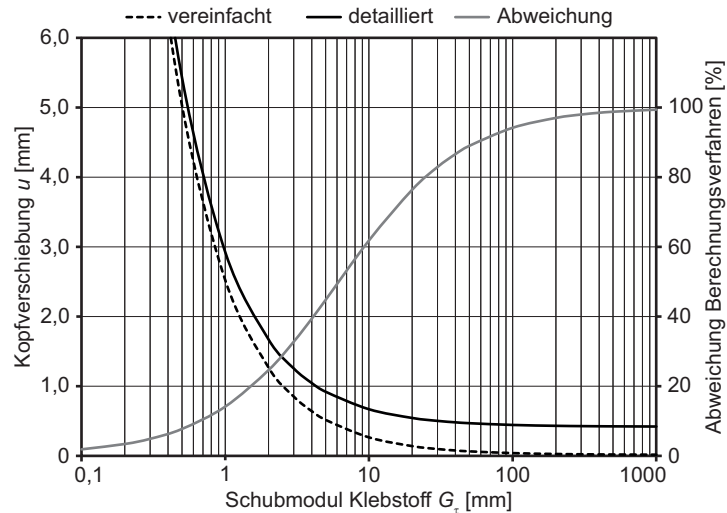
¹⁶⁷ Mit den Angaben aus Bild 45 und Bild 52 lässt sich der Horizontalkraftanteil für ein Holz-Glas-Verbundelement in Wand 1 abschätzen:
 $74,9 \text{ kN} \cdot 0,138/2 = 5,2 \text{ kN}$.

¹⁶⁸ Vergleiche beispielsweise ETA 03-0038.

sollte.¹⁶⁹ Die angenommene Beanspruchungssituation markiert dementsprechend einen Maximalwert für Holz-Glas-Verbundelemente mit Silikonklebung. Bei gleichbleibender Konstruktionsweise lässt sich das Tragverhalten aber entscheidend durch einen steiferen Klebstoff verbessern.

Bild 46

Kopfverschiebung eines 2,0 x 3,0 m großen Holz-Glas-Verbundelements. Das Element wird mit einer Horizontalkraft von 5 kN belastet. Die Verformungen werden anhand eines einfachen und eines detaillierten Federmodells (Abschnitt 4.2.4) bestimmt. Der Schubmodul der umlaufenden Klebfuge wird variiert. Die Abweichung zwischen der Berechnung mit dem einfachen und dem detaillierten Modell ist in Prozent angegeben.



Elemente mit steiferen Klebverbindungen sollten vorzugsweise mit dem detaillierten Federmodell von Hochhauser (2011a) berechnet werden. Die Schubverformung in der Klebung wird bereits bei Klebstoffen mit mittlerer Steifigkeit sehr klein. Das verdeutlicht der Kurvenverlauf zum vereinfachten Berechnungsmodell. Der Anteil der Klebschichtverformung an der Gesamtverformung des Holz-Glas-Verbundelements geht stark zurück. Bei steifen Klebstoffen dominieren die Verformungsanteile der weiteren Komponenten des Verbundelements, insbesondere die der Schraubverbindung zwischen Koppelleiste und Unterkonstruktion. Bild 47 veranschaulicht dieses Verhalten noch eindeutiger. Im Verlauf der Wandsteifigkeit, die mit dem detaillierten Federmodell berechnet wurde, bildet sich eine obere Grenze aus, die unter den angenommenen Randbedingungen aus Geometrie und Material bei knapp über 12.000 N/mm² liegt.

¹⁶⁹ Die Norm gibt für den Nachweis von Wandscheiben im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit keine Verformungsgrenzwerte vor. (Vergleiche Schickhofer 2010, S. D-123.) Von Hamm (1999, S. 121.) wird eine Begrenzung der Kopfverschiebung auf $l/300$ bis $l/500$ vorgeschlagen.

Die Elementsteifigkeit K_r beinhaltet jedoch nicht die Nachgiebigkeit der Anschlüsse zur Decke. Die vorgefertigten Holz-Glas-Verbundelemente müssen jedoch mit den Deckenplatten verbunden werden, um überhaupt Horizontalkräfte zu erhalten. Die Nachgiebigkeit dieser Verbindung wirkt sich somit auch auf die endgültige Steifigkeit der Wandscheibe aus, die bei der Lastverteilung je Geschossebene angesetzt wird. Die Gesamtsteifigkeit der Wand als Reihe linear-elastischer Federn berechnet sich wie folgt.

$$B_{\text{HGV}} = \left(\frac{1}{K_r} + \frac{h^2}{b^2 \cdot C_z} + \frac{2}{C_F} \right)^{-1} \quad \text{Gleichung 15}$$

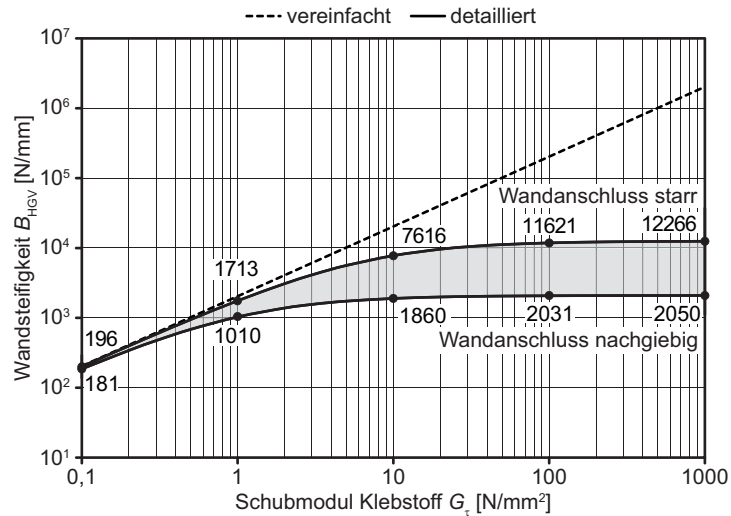
Steifigkeit des Zugankers $C_z = 8.000 \text{ N/mm}$
 Schubsteifigkeit der Fuge Wand/Decke $C_F = 16.000 \text{ N/mm}$.

Da für diese Schnittstelle Regeldetails erst noch entwickelt werden müssen, werden die Federkennwerte für Winkelverbinder aus Abschnitt 4.4.1 übernommen. Jedes Holz-Glas-Verbundelement soll durch zwei derartige Stahlwinkel gehalten sein. Für die Zugverankerung kann nur einer davon angesetzt werden.

Die beiden Graphen in Bild 47, die mit dem detaillierten Federmodell berechnet wurden, markieren näherungsweise das Spektrum an erzielbaren Wandsteifigkeiten für ein $2,0 \times 3,0 \text{ m}$ großes Holz-Glas-Verbundelement. Das Diagramm kann daher als Orientierungshilfe für die Klebstoffauswahl und zur Tragwerksoptimierung dienen. Die obere Grenze lässt sich nur durch ein Versteifen der Schraubverbindung zwischen Koppelleiste und Unterkonstruktion beziehungsweise durch direktes Kleben auf die Unterkonstruktion weiter nach oben verschieben. Die zweite Kurve rückt nach unten, wenn die Anschlüsse zur Decke und zur Wand nachgiebiger gestaltet werden. Dies wird jedoch als nicht zielführend angesehen, da die Holz-Glas-Verbundelemente am Lastabtrag beteiligt werden sollen. Die Holz-Glas-Verbundelemente zeigen im Vergleich zu Wänden aus Brettsperholz bei konstruktiv ähnlichem Anschluss an die Decke eine etwas größere Verformbarkeit.

Bild 47

Zusammenhang zwischen der Klebstoffnachgiebigkeit und der Steifigkeit eines 2,0 x 3,0 m großen HGV-Elements. Der Schubmodul und die daraus resultierende Elementsteifigkeit sind in doppelt logarithmischen Koordinaten aufgetragen. Für das Hauptintervall auf der Schubmodulachse sind die Elementsteifigkeiten explizit angegeben, da anhand dieser Werte in den folgenden Abschnitten der Horizontallastanteil auf die aussteifenden Bauteile berechnet wird.



4.4.3 Auswirkung der Elementanordnung

Die Fassade des Gebäudes lässt sich insbesondere in der unteren Geschossebene, wo das Gebäude einen oder auch mehrere Eingänge benötigt, nicht komplett durch tragende Holz-Glas-Verbundelemente ausfüllen. Für eine natürliche Belüftung sind zusätzlich öffnbare Fensterelemente erforderlich. Fassadenabschnitte mit Öffnungen können nicht zum Aussteifen des Gebäudes herangezogen werden. Tragende und nichttragende Bereiche lassen sich unterschiedlich über die Fassadenfläche verteilen, sodass hier der Einfluss der Elementanordnung untersucht wird. Bei dieser Analyse stabilisieren ausschließlich die Verglasungen in den Außenwänden das Gebäude. Die Kernwände werden nicht berücksichtigt, da sich so der Einfluss der Exzentrizität deutlicher herausstellen lässt.

Bild 48 zeigt vier mögliche Konzepte, wie aussteifende Verglasungen in der Außenfassade angeordnet werden können. Alle Varianten bestehen aus der gleichen Anzahl von Holz-Glas-Verbundelementen der Größe 2,0 m x 3,0 m. Die Elemente werden je zur Hälfte auf beide orthogonalen Wirkungsrichtungen verteilt. In der Grafik ist der prozentuale Horizontallastanteil auf die Holz-Glas-Verbundelemente in der Fassade angegeben.

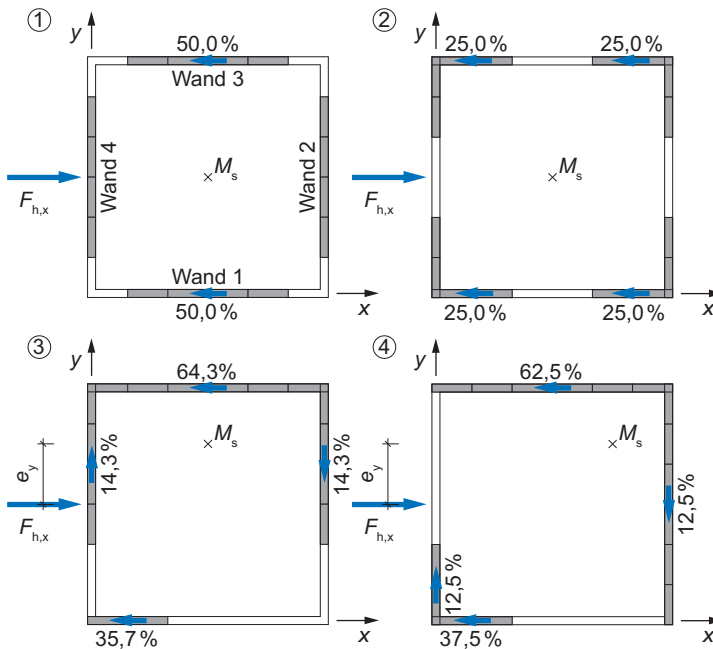


Bild 48

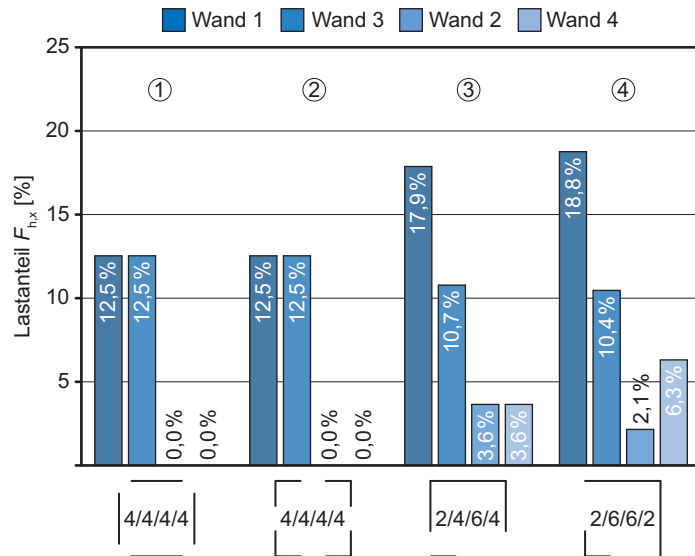
Verteilung der Horizontalkraft in x-Richtung auf die aussteifenden Holz-Glas-Verbundelemente. Dargestellt sind vier Varianten mit je acht aussteifenden Verglasungen in Lastrichtung. Für jeden Wandabschnitt wird der Horizontallastanteil in Prozent der einwirkenden Gesamtkraft $F_{h,x}$ angegeben.

- 1 vier aussteifende Verglasungen je Seite (4/4/4/4)
- 2 2 x 2 aussteifende Verglasungen je Seite (4/4/4/4)
- 3 exzentrische Anordnung, bei Fassaden parallel zur Last (2/4/6/4)
- 4 exzentrische Anordnung, bei Fassaden parallel und orthogonal zur Last (2/6/6/2)

Bei symmetrischen Systemen (Variante 1 und 2) verteilt sich die Horizontalkraft gleichmäßig auf alle acht Verbundelemente, die in der Wirkungsrichtung des Lastangriffs liegen. Entsprechend der Anzahl ergibt sich die Beanspruchung eines einzelnen Holz-Glas-Verbundelements zu 12,5 % der gesamten Horizontalkraft (Bild 49). Weist eine der beiden parallelen Wände je Wirkungsrichtung eine Überzahl an aussteifenden Elementen auf (Variante 3 und 4), verschiebt sich der Schubmittelpunkt des Aussteifungssystems in diese Richtung. Die Horizontalkraft aus Wind, die zentrisch auf die Deckenplatte einwirkt, erzeugt dann ein Moment auf die Wandquerschnitte des Aussteifungssystems. Aus der Verdrehung resultieren Kräfte in den Wänden, die orthogonal zur Wirkungsrichtung der Horizontalkraft liegen. Die Lastanteile in den längeren Abschnitten der lastparallelen Wände erhöhen sich, allerdings nicht im gleichen Verhältnis wie die Anzahl aussteifender Elemente. Die Holz-Glas-Verbundelemente in den kurzen Wandabschnitten der beiden unsymmetrischen Aussteifungsvarianten werden daher deutlich mehr beansprucht als die in der gegenüberliegenden Wand. Bei einer sehr ungleichmäßigen Anordnung (Variante 4) liegt der Anteil auf die Wände in Wirkungsrichtung des Windes etwa um den Faktor 1,5 über der Beanspruchung bei symmetrischen Systemen mit der gleichen Anzahl an Holz-Glas-Verbundelementen (Bild 49).

Bild 49

Maximale Beanspruchung eines einzelnen Holz-Glas-Verbundelements in der Fassade für die vier Varianten. Belastung des Systems in x-Richtung.



Wegen der doppelsymmetrischen Struktur des Modellgebäudes und der Windeinwirkung ergeben sich für die Horizontalkraft in y-Richtung keine höheren Beanspruchungen der einzelnen Holz-Glas-Verbundelemente. Wird nun der zentrale Kern aus Brettsperrholztäfel zusätzlich zu den aussteifenden Verglasungen in der Außenwand berücksichtigt, vermindert sich die Exzentrizität der Last bei den gezeigten unsymmetrischen Systemen, da der Schubmittelpunkt des aus den Wänden zusammengesetzten Querschnitts weiter ins Zentrum rückt. Trotz des Lastanteils, den der Kern aufnimmt, würde sich eine qualitativ ähnliche Lastverteilung auf die Elemente in der Außenwand einstellen. Das Aussteifungssystem sollte möglichst symmetrisch ausgebildet werden, um eine gleichmäßige Beanspruchung der Holz-Glas-Verbundelemente zu erzielen.

4.4.4 Lastumlagerung bei Ausfall von Elementen

Die Notwendigkeit von redundanten Tragsystemen und das Überprüfen von Ausfallszenarien bei lastabtragenden Glasbauteilen wurden in Abschnitt 3.3.2 besprochen. Der Ausfall einzelner Verglasungselemente verändert die Steifigkeitsverhältnisse im Tragsystem und beeinflusst so die Lastanteile, die auf die aussteifenden Bauteile entfallen. Holz-Glas-Verbundelemente, die durch unvorhersehbare Ereignisse wie etwa Vandalismus beschädigt worden sind, können in der Regel nur noch sehr geringe Lasten übertragen und verlieren deutlich an Steifigkeit. Gebrochene Verglasungen

könne daher nicht mehr als aussteifende Wandscheibe angesetzt werden, wodurch sich die Beanspruchung in den verbleibenden Elementen erhöht. Am Beispiel der in Bild 48 entwickelten Variante 2 wird der Ausfall von zwei Holz-Glas-Verbundelementen untersucht. In Abhängigkeit von der Lage der betroffenen Elemente lagern sich die Horizontallasten in der Außenwand um (Bild 50).

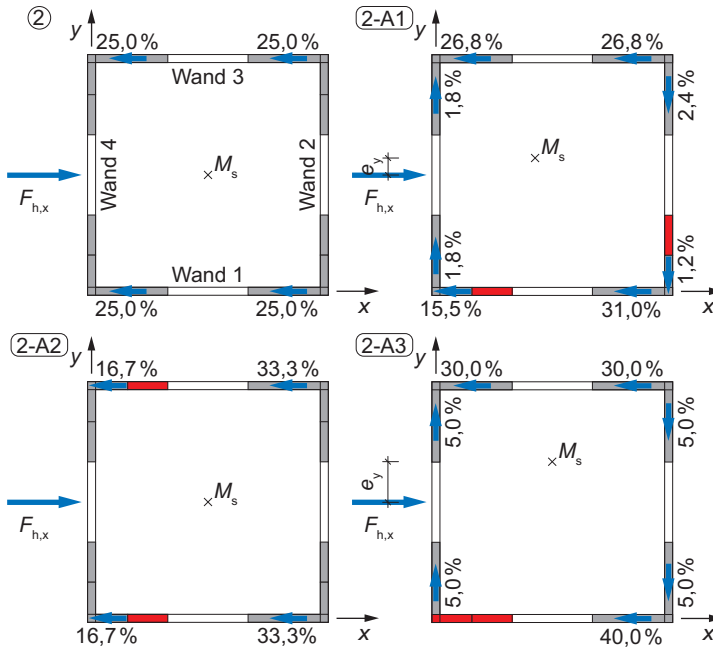


Bild 50

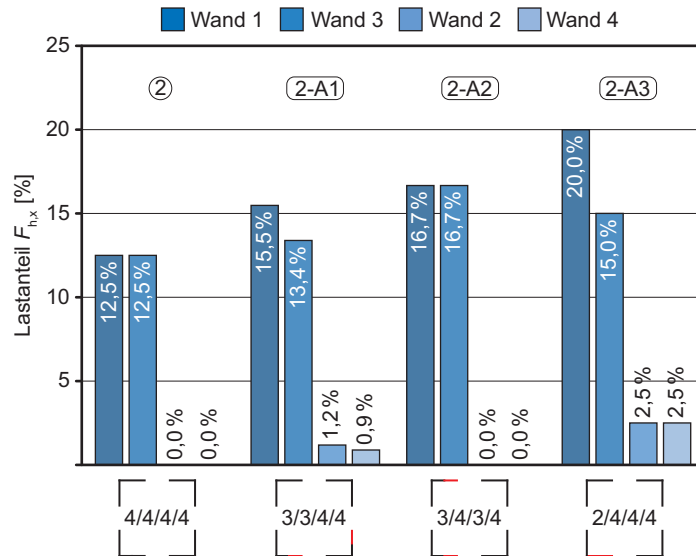
Änderung der Lastverteilung der Horizontalkraft. Ausfall von zwei Holz-Glas-Verbundelementen (rot markiert) in einem doppelsymmetrischen Aussteifungssystem.

- 2 Ausgangsvariante mit je 2 x 2 aussteifenden Verglasungen je Seite
- A1 Versagen von je einem Element in orthogonalen Fassadenbereichen
- A2 Versagen von je einem Element in parallelen Fassadenbereichen
- A3 Versagen von zwei Elementen in einem Fassadenbereich

Der ungünstigste Fall tritt ein, wenn zwei Elemente innerhalb einer Wandachse ausfallen, die parallel zur einwirkenden Horizontalkraft liegt (Variante 2-A3). Durch den Wegfall der Wände verschiebt sich der Schubmittelpunkt in Richtung der gegenüberliegenden Wand. Die Horizontalkraft greift mit großer Exzentrizität zum Aussteifungssystem an. Wand 1 erhält 40 % der gesamten Horizontalkraft in x-Richtung. Für den Lastabtrag stehen dann nur noch zwei Elemente zur Verfügung. Dadurch erhöht sich die horizontale Last am Wandkopf von 12,5 auf 20 % der insgesamt wirkenden Horizontallast (Bild 51). Durch das Moment entstehen auch Kräfte in den Wänden, die senkrecht zur Wirkungsrichtung liegen. Diese Lastanteile sind aber vergleichsweise gering.

Bild 51

Maximale Beanspruchung eines einzelnen Holz-Glas-Verbundelements in der Fassade für die Ausgangsvariante und die drei Ausfallszenarien. Belastung des Systems in x-Richtung.



4.4.5 Horizontallastanteil auf Fassade und Kern

Die Lastverteilung in einem kombinierten Aussteifungssystem aus tragender Fassadenverglasung und Kern lässt sich nach dem in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Verfahren abschätzen. Für ein Regelgeschoss des Modellgebäudes wird eine Studie zur Verteilung der Horizontalkräfte auf die aussteifenden Wände geführt, wobei die folgenden Parameter variiert werden:

- Schubmodul des Klebstoffs
- Anteil aussteifender Elemente in der Fassadenfläche
- nachgiebiger oder starrer Deckenanschluss der Elemente

Die Steifigkeit der Wände aus Brettspertholz wird Tafel 2 in Abschnitt 4.4.1 entnommen. Die Gesamtsteifigkeit der Fassadenbereiche aus mehreren Holz-Glas-Verbundelementen ergibt sich aus der Multiplikation der Elementanzahl mit der Einzelsteifigkeit der betrachteten Elemente aus Bild 47 in Abschnitt 4.4.2. Der Holz-Glas-Verbundanteil je Fassadenfläche wird erhöht oder vermindert, indem weitere Elemente hinzugefügt beziehungsweise entfernt werden. Ein einzelnes Element hat eine Breite von 2,0 m. Bei einer Außenwand aus insgesamt sechs aussteifenden Verglasungen entspricht ein Element einem Sechstel der Fassadenfläche. Bild 52 zeigt beispielhaft die Lastverteilung in der Regelgeschoßebene für eine mit jeweils vier aussteifenden Holz-Glas-Ver-

bundelelementen besetzten Fassade. Die aussteifenden Elemente bedecken zwei Drittel der Fassadenfläche. Die Kräfte verteilen sich nahezu symmetrisch auf die Wände, da die auf die Fassade wirkende Windkraft nur eine geringe Exzentrizität gegenüber dem Schubmittelpunkt des Aussteifungssystems aufweist.

nachgiebiger Anschluss HGV-Element – Decke

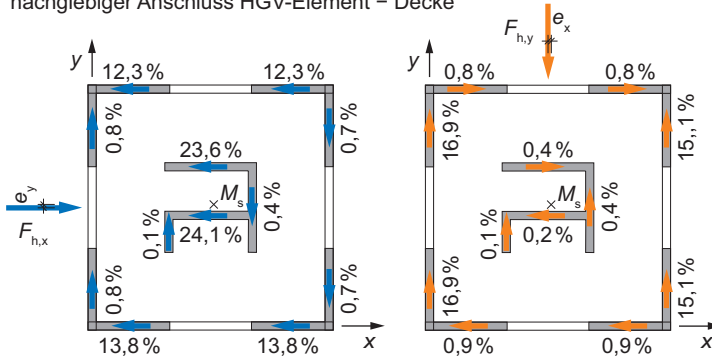
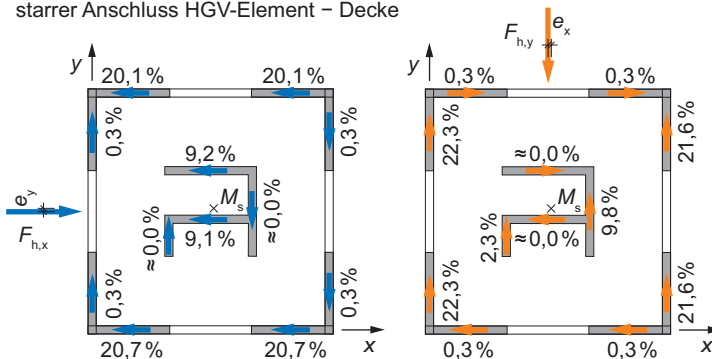


Bild 52

Verteilung der Horizontal-last in x- und in y-Richtung auf die Wandscheiben der Regelgeschossebene mit je vier aussteifenden Holz-Glas-Verbundelementen pro Fassadenseite und einem Kern aus Brettsperrholz. Der Schubmodul der Klebschicht beträgt $G = 10 \text{ N/mm}^2$. Dargestellt sind die Grenzfälle aus nachgiebigem und starrem Anschluss der Holz-Glas-Verbundelemente an die Decke.

starrer Anschluss HGV-Element – Decke



Bei einem Schubmodul des Klebstoffs von $G_\tau = 10 \text{ N/mm}^2$ entfallen etwa 40 % der Last auf jede der beiden Außenwände. Der Kern trägt die verbleibenden 20 %. Im Falle eines nachgiebigen Anschlusses der Holz-Glas-Verbundelemente muss der Kern dagegen wesentlich höhere Lasten aufnehmen. Die Beanspruchung verteilt sich dann zu etwa gleichen Teilen auf die Fassade und den Kern. Bei Lastangriff in y-Richtung liegt der Lastanteil auf der Fassade etwas höher, da der Kern für diese Richtung etwas schwächer ausgebildet ist. Die Last verteilt sich aber in ähnlicher Weise. Für diese und alle weiteren Variationen von Schubmodul und Fassadenkonfiguration wird die Lastverteilung in Bild 53 für einen nachgiebigen und in Bild 54 für einen starren An-

schluss der Holz-Glas-Verbundelemente zur Decke ausgewertet. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der Horizontalkraft, der insgesamt auf die aussteifenden Elemente in der Fassade wirkt. Dabei werden nur die Lasten auf die Wände in Wirkungsrichtung der Horizontalkraft summiert, da sich die Lastanteile aus Rotation in den Wänden quer zur Wirkungsrichtung aufheben. Die Kernwände tragen den verbleibenden Teil, der sich aus der Differenz zu 100 % ergibt.

Nur knapp über 60 % der Horizontalkraft lassen sich auf die Fassade übertragen, wenn die Verbindung zwischen der Decke und der Fassade vergleichsweise nachgiebig ausgebildet wird (Bild 53). Dieser Wert gilt allerdings nur bei Ansatz der gesamten Fassadenfläche und einer steifen Klebung. In der Praxis wäre ein Anteil von 50 % realistisch, da die Glasfassade wegen der notwendigen Öffnungen nicht vollständig zur Aussteifung herangezogen werden kann. Bei starrer Verbindung zwischen Decke und Holz-Glas-Verbundfassade werden dagegen deutlich höhere Werte erreicht (Bild 54). Mit einer wirklichkeitsnahen Fassadenkonfiguration, die zur Hälfte bis zu zwei Dritteln aus aussteifenden Verglasungen besteht, wird beispielsweise die Horizontalkraft im Verhältnis von etwa 80 % zu 20 % auf Fassade und Kern verteilt, wenn ein Klebstoff mit steifer Formulierung verwendet wird.

Die Ergebnisse aus der Parameterstudie zeigen einen nicht-linearen Zusammenhang von Lastverteilung und Klebstoffsteifigkeit. Bei sehr nachgiebigen Klebverbindungen kann die Fassade kaum eine stabilisierende Wirkung für das Gebäude entfalten. Die Mitwirkung der Fassade liegt bei einem Schubmodul von $G_{\tau} = 0,1 \text{ N/mm}^2$ weit unter 20 %. Der Großteil der Horizontalkraft entfällt auf die Wände des Gebäudekerns. Mit höheren Schubmodulwerten nimmt der Einfluss der aussteifenden Fassadenelemente sehr stark zu. Bis zu einem Wert von $G_{\tau} \approx 10 \text{ N/mm}^2$ wirkt sich das merklich auf die Lastverteilung im Aussteifungssystem aus. Das Verhältnis der Horizontalkräfte auf Fassade und Kern nähert sich dann jedoch einem Maximum für die jeweilige Fassadenkonfiguration an. Der Lastanteil ändert sich sowohl für die nachgiebig als auch für die starr berechnete Variante nicht mehr signifikant. Die Horizontalverschiebung am Wandkopf lässt sich über die Klebstoffkennwerte nicht weiter beeinflussen.

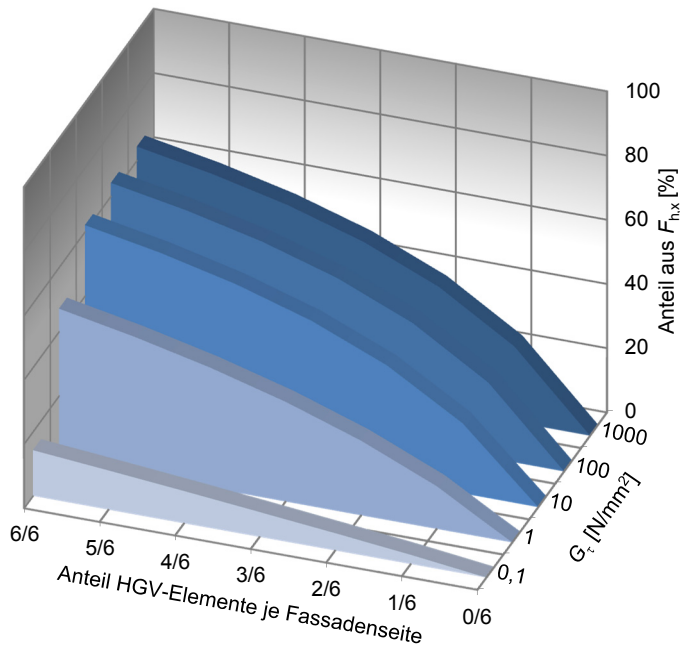


Bild 53

Verteilung der Horizontallast auf das Aussteifungssystem bei nachgiebigem Anschluss der Holz-Glas-Verbundelemente an die Decken. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der Horizontallast $F_{h,x}$, der von der Fassade insgesamt aufgenommen wird.

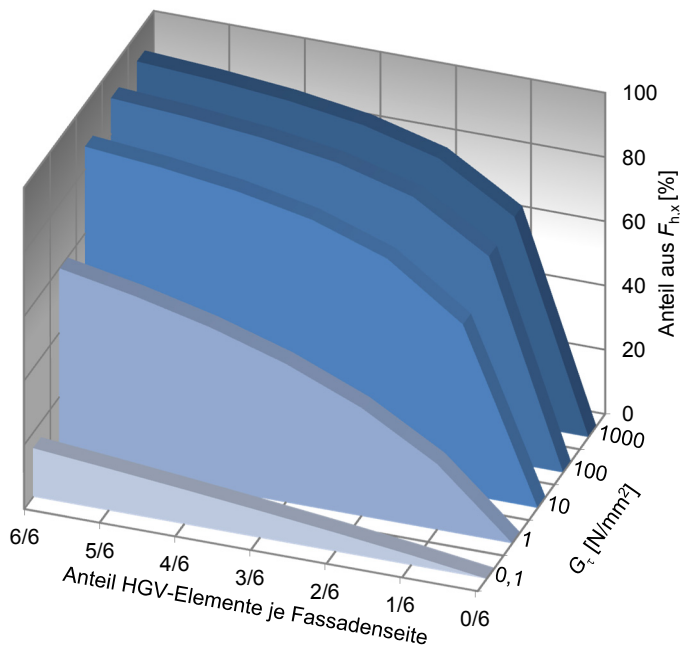


Bild 54

Verteilung der Horizontallast auf das Aussteifungssystem bei starrem Anschluss der Holz-Glas-Verbundelemente an die Decken. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der Horizontallast $F_{h,x}$, der von der Fassade insgesamt aufgenommen wird. Die Lastverteilung auf den Kern ergibt sich aus der Differenz zu 100 %.

4.5 Rückschlüsse auf die Tragsystemgestaltung und die Klebstoffauswahl

Symmetrisch angeordnete Wände führen zu einer weitestgehend einheitlichen Beanspruchung der aussteifenden Bauteile. Wenn die Gestalt und die Nutzung des Gebäudes es zulassen, empfiehlt sich daher die gleichmäßige Anordnung der aussteifenden Bauteile im Grundriss. Werden unterschiedliche Bauteile – wie in diesem Beispiel Holz-Glas-Verbundelemente und Massivholzwände – miteinander kombiniert, kann eine Exzentrizität aber auch aus den ungleichen Steifigkeiten der Bauteile resultieren. Eine einheitliche Steifigkeitsverteilung, die etwa dem Verhältnis der Wandlängen entspricht, lässt sich nur mit Klebstoffen aus dem mittleren und hohen Steifigkeitsspektrum erzielen.

Bei sehr nachgiebiger Klebverbindung trägt die Fassade nur bei einem entsprechend hohen Anteil an aussteifenden Verglasungen in hinreichendem Maße mit. Die vollständige Nutzung der Fassadenfläche zum Aussteifen des Tragwerks ist jedoch unrealistisch, da auch Bereiche für Öffnungen und Durchdringungen erforderlich sind. Das spricht ebenso für die Wahl eines steiferen Klebstoffs. Aus Gründen der Redundanz sollte jede Aussteifungsachse in Holz-Glas-Verbundbauweise jedoch mit mindestens zwei tragenden Verglasungen besetzt sein. Für das betrachtete System ergibt sich daraus ein Mindestanteil von einem Drittel tragender Verglasungen je Fassadenseite.

Bezogen auf die Steifigkeit geht aus der Parameterstudie ein wesentliches Auswahl- und Zuordnungskriterium für den Klebstoff hervor. Wird der Schubmodul näherungsweise in Zehnerpotenzschritten betrachtet, so markiert ein Wert von $G_{\tau} \approx 10 \text{ N/mm}^2$ die Grenze zwischen zwei unterschiedlichen Einflussbereichen. Unterhalb dieses Wertes zeigen sich deutliche Auswirkungen auf das Tragverhalten des Aussteifungssystems. Die Holz-Glas-Verbundelemente verformen sich stärker als die Massivholzwände im Kern. In der Folge kann die Fassade nur verhältnismäßig gering zum Lastabtrag im Aussteifungssystem beitragen. Andererseits lassen sich oberhalb dieser Steifigkeit keine signifikanten Zusatzeffekte bezogen auf die Lastverteilung mehr erzielen. Mit zunehmender Klebstoffsteifigkeit steigt jedoch auch der Einfluss von Zwangsbeanspruchungen, die beispielsweise infolge einer Längenänderung des Holzes durch Quellen

und Schwinden entstehen. Daraus erwächst die Gefahr, dass bei Verwendung von sehr steifen Klebstoffen die positiven Effekte auf das Tragverhalten durch hohe Zwangskräfte wieder aufgehoben werden.

Das Auswahlkriterium sollte sich jedoch nicht auf einen Einzelwert sondern ein breiteres Spektrum der Steifigkeit beziehen, da aus den Annahmen und den Vereinfachungen, die für die Parameterstudie getroffen wurden, unscharfe Berechnungsergebnisse resultieren. Für die Vorauswahl der Klebstoffe werden drei Steifigkeitsklassen definiert, die auf dem Elastizitätsmodul als geeigneten Vergleichswert¹⁷⁰ zur Beurteilung des deformationsmechanischen Verhaltens basieren.

Gruppe A – geringe Steifigkeit: $E < 10 \text{ N/mm}^2$

Gruppe B – mittlere Steifigkeit: $10 \text{ N/mm}^2 \leq E \leq 100 \text{ N/mm}^2$

Gruppe C – hohe Steifigkeit: $E > 100 \text{ N/mm}^2$

Ein Material mit dem zuvor identifizierten Schubmodul von $G_\tau \approx 10 \text{ N/mm}^2$ liegt im Kernbereich der Gruppe B.¹⁷¹ Von Klebschichten dieser Klasse wird erwartet, dass sich ein hoher Mitwirkungsgrad der tragenden Verglasungen beim Aussteifen des Gebäudes erzielen lässt. Gleichzeitig sollen nur moderate Zwangsbeanspruchungen entstehen. Mit Klebstoffen der Gruppe C kann der Lastanteil auf die Holz-Glas-Verbundelemente nur noch leicht gesteigert werden. Wegen der zu erwartenden hohen Zwangsbeanspruchung empfiehlt sich eine Anwendung nur, wenn andere positive Eigenschaften, wie beispielsweise eine höhere Festigkeit oder eine größere Dauerhaftigkeit, die Auswahl rechtfertigen. Gruppe A umfasst sehr nachgiebige Klebstoffe. Schon geringe Änderungen der Materialkennwerte wirken sich hier erkennbar auf

¹⁷⁰ Der Elastizitätsmodul wird im Zuge der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 5 an einer umfangreichen Klebstoffauswahl aus der Spannungs-Dehnungs-Beziehung reiner Materialproben berechnet. Im Zugversuch lässt sich die axiale Dehnung mit größerer Genauigkeit als die transversale Dehnung aufzeichnen. Daher wird der Elastizitäts- anstelle des Schubmoduls als Vergleichswert genutzt.

¹⁷¹ Für Querdehnzahlen zwischen 0,25 und 0,45, wie sie für Klebstoffe typisch sind, ergibt sich aus dem Schubmodul von $G = 10 \text{ N/mm}^2$ ein Elastizitätsmodul im Bereich von $E = 25 \dots 29 \text{ N/mm}^2$. Obwohl Klebstoffe nicht eindeutig zu den isotropen Materialien gehören, kann die Beziehung zwischen Elastizitäts- und Schubmodul für den linear-elastischen Verformungsbereich mit dem Hookschen Gesetz $E = 2G(1 + \nu)$ gut erfasst werden. (Vergleiche Habenicht 2006, S. 283.)

das Tragverhalten des Aussteifungssystems aus. Holz-Glas-Verbundelemente mit dieser Klebschicht eignen sich nur für kleinere Gebäude oder kombinierte Aussteifungssysteme, bei denen ein wesentlicher Lastanteil von anderen Bauteilen aufgenommen wird.

Die getroffene Klassifikation dient als Orientierungshilfe für eine erste Klebstoffbeurteilung und erlaubt, der begrifflichen Unterscheidung in verschiedene Steifigkeitsklassen konkrete Zahlenwerte zuzuordnen. Diese Einteilung gilt allerdings nur, solange ähnliche Randbedingungen vorherrschen. Darüber hinaus sollte die Abgrenzung zwischen den einzelnen Gruppen nicht als fixe Trennlinie sondern als fließender Übergang verstanden werden.

5 Materialauswahl und -charakterisierung

5.1 Untersuchungsprogramm

Die Kenntnis der grundlegenden Materialeigenschaften ist für die statisch-konstruktive Beurteilung und die statische Berechnung von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen unerlässlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird dazu das mechanische Verhalten von potentiell geeigneten Klebstoffen an reinen Materialprüfkörpern und in Verbindung mit typischen Substraten untersucht. Den Ablauf der Vorversuche zum Eingrenzen des Materialspektrums veranschaulicht Bild 55.

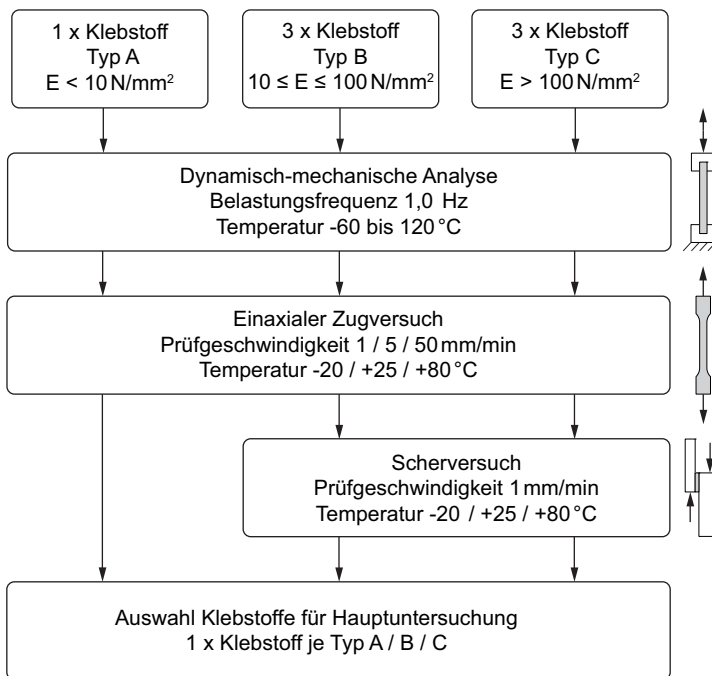


Bild 55

Versuchsprogramm zum Identifizieren geeigneter Klebstoffe für Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. Im Ergebnis werden drei Klebstoffe – einer je Steifigkeitsklasse – für die Hauptuntersuchungen ausgewählt. Da der Klebstoff aus Gruppe A bereits bei Pilotprojekten zum Holz-Glas-Verbund verwendet wurde, qualifiziert er sich automatisch für die Hauptuntersuchungen. Für diesen Klebstoff werden aber dennoch aus Gründen der Vergleichbarkeit die wichtigsten Materialkennwerte bestimmt. Auf Scherversuche wird dagegen verzichtet.

Details zum Hauptversuchsprogramm und den entsprechenden Methoden finden sich in den Kapiteln 6 und 7.

Im Fokus stehen höherfeste Klebstoffe, die vorzugsweise in den am Ende von Kapitel 4 definierten Steifigkeitsklassen B und C zu finden sind. Die Vorauswahl der Klebstoffe umfasst je drei Kandidaten pro Klasse. Zusätzlich wird ein passender, hochelastischer Klebstoff vom Typ A gewählt, dessen grundsätzliche Eignung schon in anderen Arbeiten bestätigt wurde. Mit dieser Wahl soll eine Vergleichsbasis zur aktuellen Forschung und zur momentanen Anwendungspraxis der Holz-Glas-Verbundbauweise geschaffen werden. Aufgrund der guten Datenlage genügt für diesen Klebstoff ein reduzierter Versuchsumfang. Die Hauptuntersuchungen liefern dann allerdings neue Erkenntnisse insbesondere zum Langzeitverhalten, sodass der Klebstoff dort miteinbezogen wird.

Die Vorversuche sind als Tastversuche zu verstehen, um nach dem Best-in-Class-Prinzip einen geeigneten Klebstoff aus jeder Steifigkeitsgruppe zu identifizieren. Die Hauptuntersuchungen an den drei selektierten Klebstoffen umfassen dann weitere Versuchsreihen zur Dauerhaftigkeit und zum Kriechverhalten. Dabei werden auch Prüfkörper in Bauteilgröße untersucht, um die Übertragbarkeit der im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse nachzuweisen. Die Vorversuche gliedern sich in zwei aufeinanderfolgende Abschnitte. Die erste Stufe umfasst Experimente an reinen Materialproben. Die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) und einaxiale Zugversuche liefern wichtige Kennwerte wie die Glasübergangstemperatur, den Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl. Dabei erlauben Parameter wie Prüftemperatur und Belastungsgeschwindigkeit die differenzierte Ermittlung des temperatur- und zeitabhängigen Materialverhaltens der Klebstoffe. In einem zweiten Schritt wird deren Haftverhalten überprüft. In den Scherversuchen werden jedoch nur Klebstoffe aus den Gruppen B und C getestet. Auf eine zusätzliche Überprüfung des Haftverhaltens des Klebstoffs vom Typ A wird verzichtet. Die Auswahl der Materialien für die Fügebauteile begründet sich aus dem Stand der Technik (Kapitel 2). Die Materialkennwerte werden der Literatur entnommen. Eigene Untersuchungen zum spezifischen Materialverhalten der Substrate wurden nicht durchgeführt.

5.2 Materialeigenschaften der Fügebauteile

5.2.1 Glas

In den Vor- und Hauptversuchen werden Gläser aus Kalk-Natronsilicatglas, dem gebräuchlichsten Glas im Bauwesen, verwendet. Abhängig von den erwarteten Bruchlasten wird entweder Floatglas oder Einscheibensicherheitsglas¹⁷² eingesetzt. Die höhere charakteristische Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser vermindert das Glasbruchrisiko bei Versuchen mit hochfesten beziehungsweise sehr steifen Klebstoffen. Wenn das Glas versagt, kann allgemein keine

¹⁷² Die Bezeichnung Einscheibensicherheitsglas ist für die kleinen Proben-
gläser nicht ganz präzise, da die Übereinstimmungserklärung gemäß
BRL A, Teil 1, Anlage 11.7 fehlt. Stichprobenartig untersuchte Gläser
zeigten das für ESG typische Bruchbild. Die charakteristische Biege-
festigkeit nach DIN EN 12150-1:2000-11, Tabelle 6 konnte dagegen
nicht überprüft werden. Für die Versuche ist das Erreichen des Norm-
werts allerdings nur von untergeordneter Bedeutung.

Aussage zur Festigkeit der Klebverbindung gewonnen werden. Nachteilige Einflüsse des Temperprozesses auf die Hafteigenschaften der Glasoberfläche sind nicht bekannt. Die Materialkennwerte dieser Glasprodukte wurden bereits in Kapitel 3 genannt.¹⁷³

Die Kante thermisch vorgespannter Gläser wird produktionsbedingt mindestens gefast und geschliffen, um spontanes Abplatzen von Glassplittern an den Rändern zu vermeiden. Die Kanten der Glassubstrate für die Scherprüfkörper in den Vorversuchen sind poliert (Bild 56, rechts). Insbesondere bei kleinteiligen Prüfkörpern kann diese Fase die Geometrie der Klebfuge beeinflussen, da sich die Klebung bei einigen Prüfkörpern am Rand der Glasfläche befindet. Wegen einer nicht auszuschließenden Beeinträchtigung der Ergebnisse wurde – im Gegensatz zu den Vorversuchen – für die Kleinteilproben der späteren Hauptversuche ausschließlich Floatglas mit feinjustierter Kante (Bild 56, links) eingesetzt.



Bild 56

Kantenqualitäten der Glassubstrate aus den Kleinteilversuchen. Die feinjustierte Kante hat nur eine minimale Fase ($b \leq 0,1 \text{ mm}$) und ein schleifmattes Aussehen. Die polierte Kantenoberfläche ist dagegen transparent.

Die Oberfläche der Glasproben weist keine Beschichtungen oder besondere Modifikationen auf. Der Klebstoff wird ausschließlich auf der Atmosphärenseite appliziert, um den Einfluss von Zinnoxid zu eliminieren, das sich bei der Flachglasherstellung in der badseitigen Oberfläche anlagert.¹⁷⁴

¹⁷³ Für ausgewählte Materialeigenschaften der Glasarten siehe Tafel 1.

¹⁷⁴ Vergleiche Abschnitt 3.1.4.

5.2.2 Holz und Holzwerkstoffe

Der natürliche Baustoff Holz ist aufgrund seiner inhomogenen Struktur durch ein ausgeprägt anisotropes Materialverhalten gekennzeichnet. Diese Struktur entsteht durch untereinander fest verbundene, langgestreckte Zellen, deren Zellwand aus Cellulosefibrillen, Hemicellulose und Lignin gebildet wird.¹⁷⁵ Holz wird auf makroskopischer Ebene in drei Schnittebenen betrachtet: die Quer-, die Radial- und Tangentialrichtung. Die in Längsrichtung des Stamms verlaufenden Fasern weisen sehr gute Zugeigenschaften auf. Radial oder tangential sind die im Schnitt polygonalen Zellen weniger belastbar. Der für Vollholzquerschnitte nutzbare Teil des Baumstamms wird in Kernholz und Splintholz unterteilt. Die außen liegenden Jahresringe werden als Splintholz bezeichnet. Dieser Teil des Stammes leitet das Wasser und enthält lebende Zellen. Eingelagerte Stärke, Zucker und Eiweißstoffe machen Splintholz anfällig für Pilz- und Insektenbefall. Das Kernholz besteht aus abgestorbenen Zellen und ist im Allgemeinen härter und widerstandsfähiger.¹⁷⁶

Bedingt durch die große innere Oberfläche der Kapillarräume – der Porenanteil beträgt je nach Rohdichte im Mittel 50 bis 60 % – ist Holz hygroskopisch und absorbiert Wasser aus der Umgebungsluft.¹⁷⁷ In Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen stellt sich zeitverzögert ein Gleichgewichtszustand der Holzfeuchte ein. Zahlreiche physikalische und mechanische Eigenschaften hängen vom Feuchtegehalt des Holzes ab. Die Zugfestigkeit nimmt beispielsweise mit steigender Holzfeuchte ab. Eine große Herausforderung stellt die Volumenänderung des Holzes bei Wasseraufnahme oder -abgabe dar. In Verbundkonstruktionen können Quell- und Schwindverformungen des Holzes zu hohen Zwangsbeanspruchungen in der Klebschicht und den Füge-teilen führen.¹⁷⁸

¹⁷⁵ Vergleiche Wagenführ 2012, S. 37.

¹⁷⁶ Vergleiche Wagenführ 2012, S. 18 f.

¹⁷⁷ Vergleiche Niemz 1993, S. 38.

¹⁷⁸ Ein Berechnungsbeispiel zeigt, dass die Längenänderung einer Koppelleiste aus Quellen und Schwinden ($\Delta u = 6 \%$) fünfzehnmal über dem Wert aus Temperatur ($\Delta T = 40 \text{ K}$) liegt. Infolge einer solchen Schubverzerrung wäre eine Silikonklebung zu über 40 % ausgelastet. (Vergleiche Hochhauser 2011b, S.107 f.)

Das Konstruktionsprinzip eines umlaufenden Adapterrahmens stellt eine aussichtreiche Lösung für die baupraktische Anwendung dar.¹⁷⁹ Eine solche Koppelleiste wird üblicherweise aus Baufurniersperrholzplatten (BFU) zurechtgeschnitten beziehungsweise gefräst. Das Haftvermögen der Klebstoffe wird daher zunächst auf Oberflächen von Furniersperrholz aus Birke (*Betula pendula*) untersucht. Bei den Hauptversuchen wird das Spektrum dann um ein Substrat erweitert, damit zusätzliche Erkenntnisse zum direkten Kleben auf Holzunterkonstruktionen aus Konstruktionsvollholz oder Brettschichtholz gewonnen werden können. Verwendet wird Nadelholz vom Typ Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) in astfreier Qualität. Das hochwertige Material, bei dem Fehlstellen und Äste herausgeschnitten und die verbleibenden Stücke durch Keilverzinken wieder verbunden werden, stammt aus dem Fensterbau. Bild 57 zeigt beide Materialien.

Sperrholz zählt zu den typischen Holzwerkstoffen im Bauwesen. Das hier verwendete finnische Birkenfurniersperrholz wird aus dünnen Furnierlagen, die kreuzweise miteinander verleimt sind, hergestellt. Die Nenndicke einer Lage beträgt 1,4 mm. Der Aufbau ist symmetrisch, sodass sich immer eine ungerade Anzahl Schichten ergibt. Das gewählte Sperrholz weist eine gute Dauerhaftigkeit und eine hohe Verschleißfestigkeit auf.¹⁸⁰ Die Materialkennwerte sind in beide Plattenrichtungen ähnlich. Parallel zu den Fasern der Decklage ergeben sich die höchsten Werte (Tafel 4).

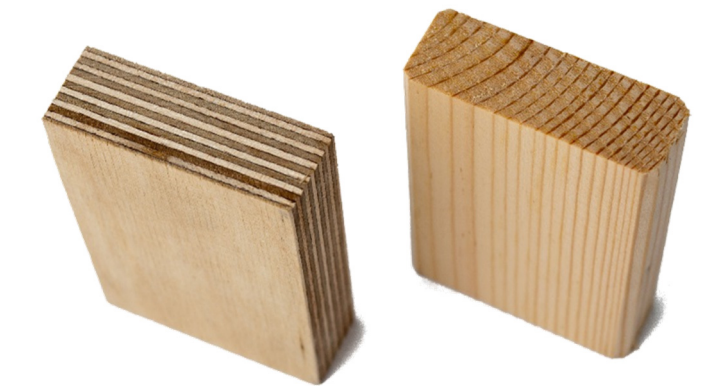
Das Kiefernholz stammt aus schwedischer Produktion und weist einen Kernholzanteil von mindestens 80 % auf. Da Abschnitte mit minderer Qualität entfernt wurden, stellen die Keilzinkverbindungen die Schwachstelle der Kanteln dar. Im Zuge einer Forschungsarbeit zu Holz-Glas-Verbundträgern wurden die elastomechanischen Eigenschaften des gleichen Materials experimentell bestimmt.¹⁸¹ Der ermittelte Elastizitätsmodul und die charakteristische Biegefestigkeit entsprechen denen von Konstruktionsvollholz der Festigkeitsklasse C35 nach DIN EN 338:2010-02. Einige Materialkennwerte in Tafel 4 beziehen sich daher auf die Angaben dieser Norm.

¹⁷⁹ Vergleiche Abschnitt 2.4.4.

¹⁸⁰ Das Phenolharz-formaldehydverleimte Sperrholz erfüllt die Anforderungen nach DIN EN 314-2:1993-08, Nutzungsklasse 3.

¹⁸¹ Vergleiche Kozłowski 2014, S. 30 f.

Bild 57
 Holzsubstrate für die Prüfkörper. Kiefernholz (links) und Birken-sperrholz (rechts). Das Kiefernvollholz wurde so zurechtgeschnitten, dass die Jahresringe möglichst senkrecht zu der Oberfläche stehen, die später verklebt wird. Die Fasern der Decklage des Birken-sperrholzes haben die gleiche Orientierung wie die Fasern des Massivholzes.



Tafel 4
 Kennwerte der verwendeten Holzsubstrate nach:

^a Finnforest 2001
^b Wagenführ 2012
^c DIN EN 338:2010-02

Die Festigkeits- und Steifigkeitsangaben zum Vollholz sind normativ geregelte Rechenwerte für Nadelholz der Festigkeitsklasse C35. Die Angaben für das Sperrholz stammen vom Hersteller und beziehen sich auf eine Nenndicke von 18 mm.

Eigenschaft	Einheit	Sperrholz Birke	Vollholz Kiefer
Mittlere Rohdichte ρ_m	[kg/m ³]	680 ^a	480 ^c
Elastizitätsmodul	[N/mm ²]		
$E_{m, }/E_{m,0,mean}$		10.050 ^a	13.000 ^c
$E_{m,\perp}/E_{m,90,mean}$		7.450 ^a	430 ^c
Biegefestigkeit	[N/mm ²]		
$f_{m, }/f_{m,k}$		40,2 ^a	35 ^c
$f_{m,\perp}$		34,1 ^a	–
Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_{T, }$	10 ⁻⁶ /K	4,2 ^b	3,65...4,00 ^b
Gleichgewichtsfeuchte bei 20 °C und 65 % rF	[%]	12 ^a	12 ^b
Diff. Quell-/Schwindmaß in Plattenebene/radial senkrecht/tangential	[% je %]	0,014 ... 0,024 ^b 0,22 ... 0,40 ^b	0,19 ^b 0,36 ^b

5.3 Klebstoffe

5.3.1 Auswahlkriterien für Holz-Glas-Klebungen

Klebstoffe, die zu einem überwiegenden Teil auf organischen Verbindungen basieren, lassen sich nur schwer mit anderen Werkstoffen aus dem Bauwesen vergleichen. Das Materialverhalten ist nicht nur von der Belastung selbst sondern auch von der Temperatur, der Belastungsgeschwindigkeit und der Einwirkungsdauer abhängig. Durch eine chemische Modifikation der Grundstoffe und durch Zugabe von Additiven und anderen Füllstoffen lassen sich die Eigenschaften der Klebstoffe erheblich beeinflussen. Dem Anwender bietet sich damit ein riesiges und im ständigen Wandel

befindliches Spektrum an verfügbaren Produkten, die jeweils auf spezifische Anwendungsfelder zugeschnitten sind. Im Bauwesen werden Klebstoffe vorrangig für nichttragende Zwecke eingesetzt. Eine Ausnahme bilden die schon besprochenen Structural-Sealant-Glazing-Systeme. Eine passgenaue Klebstoffauswahl ist nur möglich, wenn die Randbedingungen der geplanten Klebung eindeutig definiert sind.

Für die Klebstoffauswahl wurde daher ein Anforderungsprofil erarbeitet, das sich auf Holz-Glas-Verbundelemente zur Aussteifung von Holztragwerken bezieht. Es wird angenommen, dass die geschosshohen Holz-Glas-Verbundelemente manuell im Werk verklebt werden. Aus technologischen und ergonomischen Gründen richtet man die Verglasung beim Kleben horizontal aus. Der Klebstoff lässt sich dann von der Seite in die Fuge applizieren. Weitere Randbedingungen ergeben sich aus der Charakteristik der Substratmaterialien Holz und Glas. Fügeteiltoleranzen, die gerade beim Holz relativ groß sind, können zum Beispiel nur von Klebschichten mit entsprechender Dicke ausgeglichen werden.

Die folgenden Anforderungen wurden festgelegt.

Klebfugengeometrie:

- linienförmige Klebung, flach rückseitig auf Verglasung
- Breite $5 \text{ mm} \leq b \leq 25 \text{ mm}$
- Dicke $1 \text{ mm} \leq d \leq 10 \text{ mm}$
- Länge¹⁸² $l \leq 6000 \text{ mm}$

Herstellung und Aushärtung der Klebung:

- Viskosität $\geq 15.000 \text{ mPas}$ (hochviskos bis pastös)
- Aushärtung bei Raumtemperatur
- Zeitfenster für das Kleben eines Elements ca. 15 – 30 min
- Zeit bis Hand-/Transportfestigkeit $\leq 24 \text{ h}$
- Zeit bis Endfestigkeit vorzugsweise $\leq 7 \text{ d}$, maximal $\leq 31 \text{ d}$

Eigenschaften der ausgehärteten Klebschicht:

- elastisches bis zähelastisches Verformungsvermögen
- Temperatureinsatzbereich -20 °C bis $+80 \text{ °C}$
- hohe Beständigkeit gegenüber Umwelteinwirkungen
- neutrale Farbe wie schwarz, grau oder weiß

¹⁸² Das Standardbandmaß von Floatglas beträgt 3,21 m x 6,00 m. Die Maximallänge der Klebfuge orientiert sich an dieser Größe.

Auf Basis dieser Bedingungen erfolgte eine umfassende Recherche zu geeigneten Klebstoffen. Im Allgemeinen war eine Vorauswahl anhand der Herstellerangaben in den Datenblättern möglich. Das Ergebnis wurde mit dem jeweiligen Klebstoffhersteller diskutiert und bei einer abweichenden Empfehlung für die finale Auswahl entsprechend korrigiert.

5.3.2 Vorauswahl der Klebstoffsysteme

Insgesamt sieben Klebstoffe werden in den Vorversuchen analysiert. Das Untersuchungsspektrum umfasst einen Klebstoff der Steifigkeitsklasse A und jeweils drei Klebstoffe aus den beiden höheren Klassen B und C. Alle Systeme gehören zur Gruppe der chemisch reagierenden Klebstoffe¹⁸³ und erfüllen die zuvor definierten Anforderungen. Die wichtigsten Eigenschaften fasst die Übersicht in Tafel 5 zusammen.

Der neutral kondensationsvernetzende zweikomponentige Silikonklebstoff Ottocoll S660 als Vertreter aus der Gruppe der nachgiebigen Systeme wurde speziell für Holz-Glas-Klebung entwickelt. Das Materialverhalten wurde bereits in mehreren Forschungsarbeiten untersucht und ist vergleichbar mit dem anderer Silikonklebstoffe für Structural-Sealant-Glazing-Anwendungen. Das ausgehärtete Silikon zeichnet sich durch eine hohe Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung, hohen Temperaturen, Wasser und Feuchtigkeit aus. Wegen seiner hohen Dehnelastizität lassen sich ungleiche Längenänderungen in den Fügeteilen gut kompensieren. Die bemerkenswerte Witterungsbeständigkeit, die annähernd temperaturunabhängige Flexibilität und die hohe Temperaturstabilität resultieren aus dem anorganischen Grundgerüst der Silikone, das sich deutlich von rein organisch aufgebauten Systemen unterscheidet.¹⁸⁴ Die Molekülketten, die auch untereinander vernetzt sein können, bestehen zum einem großen Teil aus Silizium-Sauerstoff-Verbindungen.

Für die Gruppe mit mittlerer Steifigkeit wurden Klebstoffe auf Basis von Polyurethan, Epoxidharz und Acrylat ausgewählt.

¹⁸³ Im ausgehärteten Zustand unterscheiden sich die Polymere vorrangig durch den Vernetzungsgrad und die Ausrichtung der Molekülketten. Dauerhaftigkeit und Materialverhalten hängen maßgeblich von der molekularen Struktur ab. Die Merkmale verschiedener Polymerstrukturen werden u. a. bei Weller 2011, S. 594 f. detailliert beschrieben.

¹⁸⁴ Vergleiche Habenicht 2006, S. 125 f.

Klebstoff	Ottocoll® S660	DELO-PUR® 9895	nolax C44.8505	SikaFast® 5215	Araldite® 2029	DUOPOX® AD840	Scotch-Weld™ DP 490
Hersteller	Hermann Otto GmbH	DELO	Nolax AG	Sika	Huntsman	DELO	3M
Basis	2K-Silikon Alkoxy	2K- Polyurethan	2K- Epoxid silanterminiert	2K- Acrylat	2K- Polyurethan	2K- Epoxidharz	2K- Epoxidharz
Farbe	schwarz	hellbeige	dunkelgrau	grau	grau	dunkelgrau	schwarz
Konsistenz	pastös (standfest)	pastös	pastös (standfest)	pastös (standfest)	pastös	pastös (thixotrop)	pastös (thixotrop)
Aushärtung	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT
Verarbeitung	15–35 min	30 min	60 min	5 min	40 min	90 min	90 min
handfest	24 h	7 h	24 h	15 min	4 h	7 h	4–6h
vollständig	28 d	72 h	21 d	1 h	24 h	72 h	7 d
Einsatzbe- reich [°C]	-40 °C +150 °C	-40 °C +100 °C	-40 °C +110 °C	-40 °C +80 °C	k. A.	-40 °C +140 °C	-55 °C +120 °C
E-Modul	k.A.	100 N/mm ²	60 N/mm ²	250 N/mm ²	580 N/mm ²	1700 N/mm ²	k. A.
Bruchdehn.	350 %	30 %	250 %	150 %	39 %	6 %	k. A.
Shore-Härte	45 (A)	90 (A) 50 (D)	87 (A)	90 (A) 50 (D)	k. A.	76 (D)	k. A.
Steifigkeits- klasse	A	B	B	B	C	C	C

Tafel 5
Herstellerangaben zu den
ausgewählten Klebstoffen

Der universelle Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff DELO-PUR 9895 wird beispielsweise zum Verkleben von Gehäusen im Maschinen und Aggregatebau genutzt. Der Hersteller empfahl das System in Kennnris der aufgestellten Anforderungsliste für den Holz-Glas-Verbund. Sowohl unter statischen als auch unter dynamischen Lasten zeigen die Klebschichten aus diesem Material hohe Festigkeiten.

Der Klebstoff nolax C44.8505 besteht aus einer silantermi- nierten Polymerkomponente und einer Epoxidharzkompo- nente.¹⁸⁵ Durch diese Kombination wird eine hohe Festigkeit

¹⁸⁵ Silanterminierte Polymere (auch: silanmodifizierte Polymere) werden häufig als Hybridpolymere bezeichnet, da sie die Eigenschaften ver- schiedener Klebstoffgruppen vorteilhaft kombinieren. Bei Epoxidharz- Blends werden dem silanfunktionellen Polyether und dem Epoxidharz der Reaktionsstoff für die jeweils andere Komponente zugefügt. Nach dem Mischen der beiden Komponenten bildet sich dann eine stabile Molekülstruktur. (Vergleiche Habenicht 2006, S. 129 f).

der Klebschicht erreicht und gleichzeitig die Nachgiebigkeit der Verbindung gegenüber klassischen Klebstoffen auf Basis von Epoxidharz erhöht. Der ausgewählte Klebstoff wird zum Fügen im Karosserie-, Fahrzeug- und Schiffsbau sowie zum Kleben von Fassadenelementen und Paneelen eingesetzt. Gute Hafteigenschaften werden auf Glas, Kunststoff, Holz und Metall aber auch auf mineralischen Baustoffen erreicht. Laut Hersteller weist das Material eine gute Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit auf. Wegen seiner verbesserten elastischen Eigenschaften empfiehlt sich das System für Klebschichten zwischen unterschiedlichen Werkstoffen.

Mit SikaFast-5215 vervollständigt ein besonders schnell härtendes System die Klebstoffauswahl in der Gruppe B.¹⁸⁶ Der Vorteil liegt in einer zügigen Transportfähigkeit und Belastbarkeit der verklebten Bauteile. Gleichzeitig genügt die offene Zeit von fünf Minuten den Minimalanforderungen an die Herstellung.¹⁸⁷ Der Klebstoff basiert auf einer zweikomponentigen Acrylatformulierung, die durch Polymerisation aushärtet. Die Komponente A enthält das Monomer, Komponente B den Initiator. Ausgehärtete Klebschichten aus diesem Material weisen eine hohe Festigkeit auf und sind daher insbesondere für strukturelle Anwendungen geeignet. Der Hersteller gibt eine gute Haftung auf Glas an.

Ein Polyurethan- und zwei Epoxidharzklebstoffe gehören zur Auswahl in Gruppe C. Der höherfeste Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff Araldite 2029 eignet sich besonders für strukturelle Klebverbindungen. Hauptanwendungsgebiete sind der Automobilbau, der Schienenfahrzeugbau und der Schiffsbau, wo beispielsweise Inneneinrichtungen mit diesem Klebstoff geklebt werden. Hohe Haftfestigkeiten werden unter anderem auf Metallen erreicht. Zum Haftvermögen auf Glas- oder Holzoberflächen lagen allerdings keine detaillierten Angaben vor. Der Hersteller empfahl dennoch diesen

¹⁸⁶ Der in Tafel 2 angegebene Elastizitätsmodul von 250 N/mm² wurde vom Hersteller bei einer Prüfgeschwindigkeit von 200 mm/min nach DIN EN ISO 37 ermittelt. Bei 1 mm/min sind wesentlich geringere Modulwerte zu erwarten. Der Klebstoff wurde daher noch der Gruppe mit mittlerer Steifigkeit zugeordnet.

¹⁸⁷ In Anbetracht der maximalen Elementdimensionen dauert das Verkleben von Koppelleisten und Verglasung insgesamt im Minimum etwa 15 Minuten (Abschnitt 5.3.1). Bei fugenweisem Kleben und Glätten erscheinen fünf Minuten Verarbeitungszeit noch realistisch.

Klebstoff auf Basis der für den Holz-Glas-Verbund aufgestellten Auswahlkriterien. Die Aushärtungsmechanismen und somit auch das Klebstoffspektrum sind in der Gruppe der Polyurethane sehr vielfältig. Bei einem Zweikomponenten-Reaktionsklebstoff, wie er hier verwendet wird, reagiert niedermolekulares Polyisocyanat mit niedermolekularem Polyol. Die Wärmebeständigkeit ist in der Regel geringer als bei Epoxidharzklebstoffen.¹⁸⁸ Die höhere Flexibilität der Polyurethane kann sich aber bei Materialverbunden als Vorteil erweisen, da ungleiche Längenänderungen kompensiert werden können.

DELO-DUOPOX AD840 ist ein hochfester Konstruktionsklebstoff auf Basis von Epoxidharz. Wegen des guten Haftvermögens auf vielen Substraten lässt sich der Klebstoff universell einsetzen. Die chemische Zusammensetzung wurde so konfiguriert, dass durch das Relaxieren langkettiger Polymerbestandteile Zwangsbeanspruchungen zwischen unterschiedlichen Materialien in geringem Umfang ausgeglichen werden können. Der gefüllte Klebstoff härtet bei Raumtemperatur aus. Die Vernetzung kann dessen ungeachtet durch Erwärmen beschleunigt werden.

Ähnliche Eigenschaften weist der Epoxidharzklebstoff Scotch-Weld DP 490 auf. Nach dem Mischen kann die Klebstoffrohmasse noch relativ lange verarbeitet werden. Die Festigkeit nimmt dann sehr schnell zu, sodass die gefügten Teile bereits nach etwa vier bis sechs Stunden umgelagert, transportiert oder weiterverarbeitet werden können. Das Klebstoffsystem wurde für das Kleben von verschiedenen Metallen und Kunststoffen entwickelt, zeigt aber auch auf Glas eine hervorragende Haftfestigkeit.¹⁸⁹ Klebschichten zwischen 0,05 und 0,15 mm Dicke erreichen die höchsten Werte. Dieses Optimum liegt deutlich unter dem planmäßigen Zielwert für Holz-Glas-Verbundelemente. Aufgrund der pastösen Konsistenz können aber auch Klebschichten von mehreren Millimetern Dicke gefüllt werden.

¹⁸⁸ Vergleiche Habenicht 2006, S. 97.

¹⁸⁹ Der Klebstoff wurde beispielsweise bei einer experimentellen Ganzglasschalenkonstruktion eingesetzt. Die Versuche zur Klebstoffauswahl und zur Kennwertermittlung sind bei Blandini (2007) beschrieben.

5.4 Experimentelle Methoden zur Charakterisierung der Klebstoffe

5.4.1 Dynamisch-mechanische Analyse

Die dynamisch-mechanische Analyse ist ein Verfahren, mit dem sich das viskoelastische Materialverhalten von polymeren Materialien wie den Klebstoffen näher untersuchen lässt. Eine kleine Materialprobe wird im Analysegerät durch eine sinusförmige Last beansprucht und die resultierenden Verformungen ausgewertet. Viskoelastische Materialien zeigen eine gegenüber der Lastschwingung zeitlich versetzte Materialantwort. In Abhängigkeit von der Temperatur und der Belastungsfrequenz kann aus den Amplituden von Spannung und Dehnung der komplexe Elastizitätsmodul E^* bestimmt werden, der die Steifigkeit des Materials beschreibt. Dieser komplexe Modul setzt sich wiederum aus zwei Teilgrößen zusammen: dem Speichermodul E' (Realteil) und dem Verlustmodul E'' (Imaginärteil). Der Speichermodul charakterisiert die elastischen Eigenschaften des Materials, während der Verlustmodul für die viskosen Verformungsanteile – folglich die Dämpfungseigenschaften des Materials – steht. Das Verhältnis von Verlust- zu Speichermodul wird als Verlustfaktor $\tan \delta$ bezeichnet. Der Wert kennzeichnet die Phasenverschiebung zwischen Belastung und Deformation.¹⁹⁰

Anhand des Kurvenverlaufs dieser Kenngrößen als Funktion der Temperatur kann der Glasübergang ermittelt werden – ein Temperaturbereich, in dem die Polymerstruktur des Klebstoffs stark erweicht. Im Glasübergangsbereich treten signifikante Veränderungen im Materialverhalten auf, die das Verformungsvermögen, die Festigkeit und die Haftung des Klebstoffs betreffen können. Die Glasübergangstemperatur ist somit für den praktischen Einsatz und das Festlegen von Anwendungsgrenzen von hoher Relevanz.

Die Analyse erfolgt an einem Gerät der Firma Netzsch vom Typ DMA 242 C. Dazu werden kleine, etwa 0,2 mm dicke Rechteckstreifen aus dem Klebstoffmaterial angefertigt.¹⁹¹

¹⁹⁰ Die Kennwerte Speichermodul E' , Verlustmodul E'' , Phasenwinkel δ und Verlustfaktor $\tan \delta$ und die entsprechenden mathematischen Zusammenhänge werden in DIN EN ISO 6721-1 definiert.

¹⁹¹ Die Probenherstellung unterliegt den gleichen Prinzipien und Aushärtedauern wie bei den in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Zugversuchen.

Die Probe wird im Zugmodus unter einer Frequenz von 1 Hz dynamisch belastet. Die Analyse läuft von -60 °C bis +120 °C, wobei sich die Temperatur mit einer konstanten Heizrate von 1 K/min langsam erhöht. Der baupraktisch relevante Anwendungstemperaturbereich wird durch diese Messgrenzen großzügig erfasst.¹⁹²

5.4.2 Einaxialer Zugversuch

Einige mechanische Kennwerte kann man auch den Datenblättern der Klebstoffhersteller entnehmen. Die Angaben sind jedoch nicht immer einheitlich. Häufig unterscheiden sich die verwendeten Prüfverfahren oder die Versuchsbedingungen. Darunter leidet die Vergleichbarkeit. Anhand von einaxialen Zugversuchen nach DIN EN ISO 527-1 werden die Kennwerte daher selbst generiert und umfangreiche Daten zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten der ausgewählten Klebstoffe gesammelt. Die Zugversuchsnorm zählt zu den am häufigsten angewendeten und zitierten Normen in der Kunststoff- und Verbundwerkstoffindustrie.¹⁹³ Gleichzeitig hat sich dieses Prüfverfahren auch bei der Kennwertermittlung von Klebstoffen bewährt.¹⁹⁴ DIN EN ISO 10350-1 definiert einheitliche Versuchsbedingungen zum Bestimmen sogenannter Einpunktkennwerte, die herangezogen werden, um ähnliche Materialien miteinander zu vergleichen. Der Elastizitätsmodul, die Streckgrenze oder die Bruchdehnung sind typische Einpunktkennwerte.

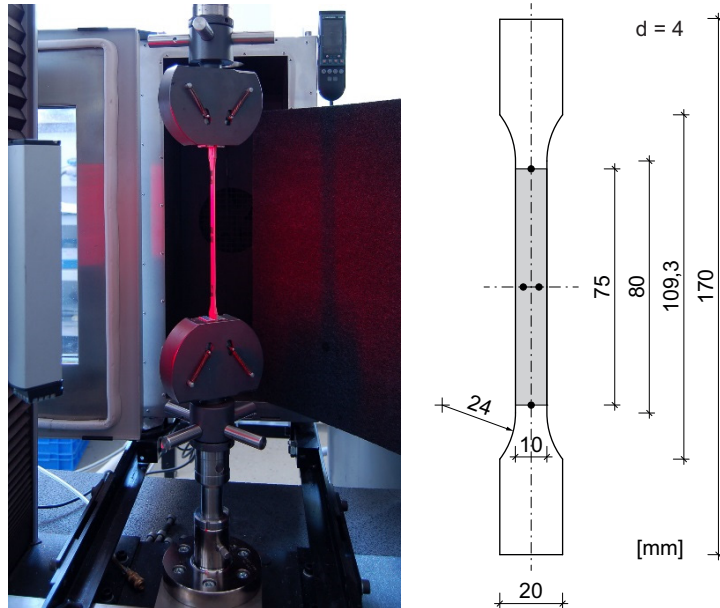
Die Zugversuche erfolgen an einer elektromechanischen Universalprüfmaschine Modell Instron 8851 mit Temperierkammer, die über ein optisches Dehnungsmesssystem verfügt (Bild 58). Die Vielzweckprüfkörper vom Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 werden in Längsrichtung mit einer konstanten Dehnrage auf Zug beansprucht. Ungewollte Stauungen der Prüfkörper, die beim Einspannen entstehen können, werden durch eine geringe Vorkraft ausgeglichen. Die Zugkraft wurde so gewählt, dass die Dehnungen unterhalb des Auswertebereichs für den Elastizitätsmodul liegen.

¹⁹² Die Standardmessfrequenz bei der DMA liegt bei 1 Hz. Es wird empfohlen, die Starttemperatur mindestens 30 bis 50 °C unterhalb des erwarteten Effekts zu wählen. (Vergleiche Ehrenstein 2003, S. 275.)

¹⁹³ Vergleiche Fahrenholz 2011, S. 4.

¹⁹⁴ Vergleiche Weller 2011, S. 620 f.

Versuchskonfiguration für einaxiale Zugversuche und Maße des Vielzweckprüfkörpers Typ 1A nach Prüfnorm DIN EN ISO 527-2. Die Prüfkörper werden exakt in der Zugachse ausgerichtet und durch mechanische Keilspannzeuge gehalten. Der Abstand der Probenhalter beträgt zu Versuchsbeginn 115 mm. Ein Videoeextensometer zeichnet die Verformungen des Prüfkörpers in Längs- und in Querrichtung berührungslos auf. An den Rändern des 75 mm langen Messbereichs befinden sich dazu stark kontrastierende Messpunkte.



Bis auf die Prüfkörper aus Silikonklebstoff¹⁹⁶ werden alle Proben in einer Gießform hergestellt. Die Verarbeitung der Klebstoffkomponenten erfolgt aus Doppelkartuschen mit Statikmischern nach Vorgabe des Herstellers, wobei auf

¹⁹⁶ Die Prüfkörper aus Silikon werden aus einer 4 mm dicken Platte aus der vollständig ausgehärteten Klebstoffmasse ausgestanzt.

eine homogene Durchmischung und blasenfreies Auftragen geachtet wird. Überschüssiges Material wird anschließend mit einem Spachtel abgezogen und die Oberfläche geglättet (Bild 59). Nach etwa 24 Stunden sind die Prüfkörper in der Regel handfest ausgehärtet und können der Form entnommen werden. Die Schulterstäbe lagern danach bei konstanten Laborbedingungen (etwa 23 °C und 50 % rF), bis die Endfestigkeit erreicht ist. Die Aushärtedauer beträgt standardmäßig sieben Tage, auch wenn die Hersteller fallweise kürzere Zeiträume angeben. Eine Ausnahme bilden die zwei Klebstoffsysteme Ottocoll S660 und nolax C44.8505, die länger benötigen, um vollständig auszuhärten. Für diese Materialien werden die planmäßigen Vorgaben des Herstellers eingehalten. Die Zugprüfung von nolax C44.8505 beginnt deshalb erst nach 21 Tagen, die von Ottocoll S660 erst nach 28 Tagen.

Variation	Prüfbedingungen		Abbruchkriterien
	Temperatur	Geschwindigkeit	
Standard ^a	RT	1 mm/min	Bruch oder $\varepsilon > 50\%$ ^c
Mittlere Dehnrate ^b	RT	5 mm/min	Bruch oder $\varepsilon > 100\%$ ^c
Hohe Dehnrate ^c	RT	50 mm/min	Bruch
Hohe Temperatur ^a	+80 °C	1 mm/min	Bruch oder $\varepsilon > 50\%$
Tiefe Temperatur ^a	-20 °C	1 mm/min	Bruch oder $\varepsilon > 50\%$

Tafel 6
Prüfbedingungen für den einaxialen Zugversuch. Die Prüfgeschwindigkeiten werden abhängig vom Kennwert nach DIN EN ISO 10350-1, Tab. 2 festgelegt:

- ^a Zug-Modul
- ^b Bruchspannung/-dehnung bei spröden Materialien
- ^c Bruchspannung/-dehnung, Streckspannung/-dehnung bei anderen Materialien

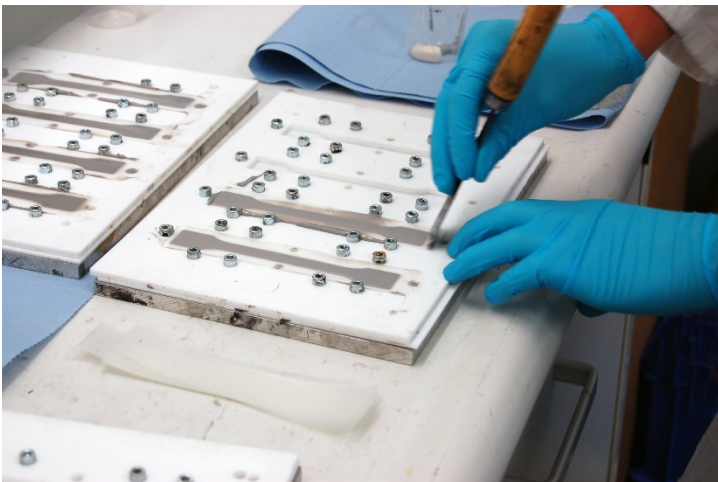


Bild 59
Herstellen der Vielweckprüfkörper unter Laborbedingungen. Das Klebstoffgemisch wird in eine Gießform aus Polytetrafluorethylen (PTFE) gefüllt und geglättet. Prüfkörper mit Einfallstellen (Differenz $\Delta d \leq 0,1\text{ mm}$) werden aussortiert.

5.4.3 Scherversuch

Materialkennwerte allein genügen nicht, um die Eignung des Klebstoffs im Rahmen der Vorauswahl zu beurteilen. Das Haftvermögen des Klebstoffes auf den beiden Substraten Glas und Holz lässt sich nur an gefügten Prüfkörpern ermitteln. Die Haftfestigkeit der Klebstoffe wird daher in Scherversuchen bei Raumtemperatur sowie bei hohen und tiefen Temperaturen bestimmt.¹⁹⁷ Die Prüfkörpergeometrie und der Versuchsaufbau orientieren sich an Versuchsmethoden, die schon an anderer Stelle zur Beurteilung von lastabtragenden Klebungen zwischen Holz und Glas eingesetzt wurden.¹⁹⁸

Die einschnittigen Scherprüfkörper bestehen aus Birken-sperrholz und aus thermisch vorgespanntem Glas. Die Wahl fiel auf Sperrholz, da sich der Holzwerkstoff für die Herstellung von Koppelleisten eignet. Die Füge Teile werden so miteinander verklebt, dass die Fasern der Decklage in Richtung der einwirkenden Scherkraft orientiert sind. Die Klebung hat eine Breite von 50 mm und eine Überlappungslänge von 12 mm. Die Klebschichtdicke beträgt einheitlich 1 mm, da höherfeste Klebstoffe bei eher dünnen Schichtstärken optimale Eigenschaften erreichen. Bild 60 zeigt die weiteren Abmessungen des Prüfkörpers und den Prüfaufbau.¹⁹⁹

Die Scherversuche werden wie zuvor die einaxialen Zugversuche an der elektromechanischen Universalprüfmaschine Modell Instron 8851 durchgeführt. Da sich die Prüfkörper nicht in typische Keilspannzeuge einspannen lassen, wurde eine spezielle Schervorrichtung entwickelt. Durch diese Vorrichtung werden Zug- in Druckkräfte umgewandelt. Diese wirken auf die horizontalen Kantenflächen der Füge Teile, die direkt an der Klebschicht liegen. Klemmen halten das jeweils äußere Ende des Prüfkörpers und verhindern so dessen Verdrehen. Beide Seiten der Vorrichtung verschieben sich parallel, sodass eine reine Schubbeanspruchung entsteht.

¹⁹⁷ Ein Teil der Scherversuche wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (Aßmus 2012) durchgeführt.

¹⁹⁸ Vergleiche Blyberg 2012.

¹⁹⁹ Die Abmessungen der Klebschicht orientieren sich an H-Prüfkörpern nach ETAG 002-1, Tab. 5. Die Dicke weicht jedoch davon deutlich ab. Andere Forschungsarbeiten zum Holz-Glas-Verbund (Neubauer 2011, S. 38., Niedermaier 2005, S. 89 und Kreher 2004a, S. 99.) nutzen gleiche oder ähnliche Abmessungen.

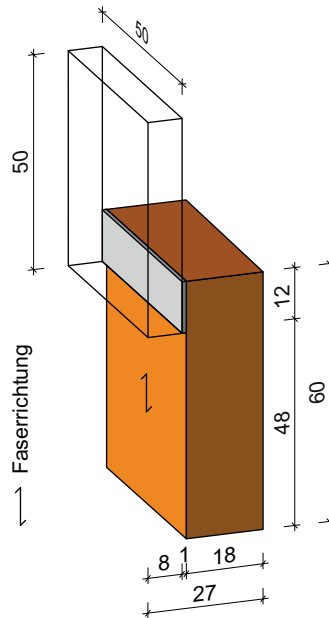


Bild 60

Prüfvorrichtung für Scherversuche und Abmessungen des Prüfkörpers. Die Fasern der obersten Furnierlage des Prüfkörpers sind in Krafrichtung orientiert. Zwischen Glas und Metall befinden sich dünne Zwischenlagen, um einen harten Kontakt zu verhindern. Hakenförmig Knaggen fixieren die äußeren Enden des Prüfkörpers. Vier Wellen, die durch ein Linearlager in der Kopf- und Fußplatte geführt sind, sorgen für eine parallele Verschiebung der beiden Teile der Prüfvorrichtung. Die Prüfkörper erhalten eine Vorkraft von 30 N, um den Schlupf aus dem System zu nehmen. Während des Versuchs werden der Traversenweg und die Kraft gemessen.

Da die Fügeiteile aufgrund ihrer großen Dicke relativ starr sind, wird keine maßgebende Biege- oder Schälbeanspruchung der Klebschicht erwartet. Die Klebung steht weitestgehend unter Schubspannung. Die Scherversuche erfolgen bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, bei Raumtemperatur und bei $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Prüfsystem fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 mm/min . Mindestens fünf Prüfkörper werden je Variation und Klebstofftyp bis zum Bruch belastet. Die Bruchkraft und das Versagensbild liefern wertvolle Erkenntnisse zum Haftverhalten der Klebstoffe.

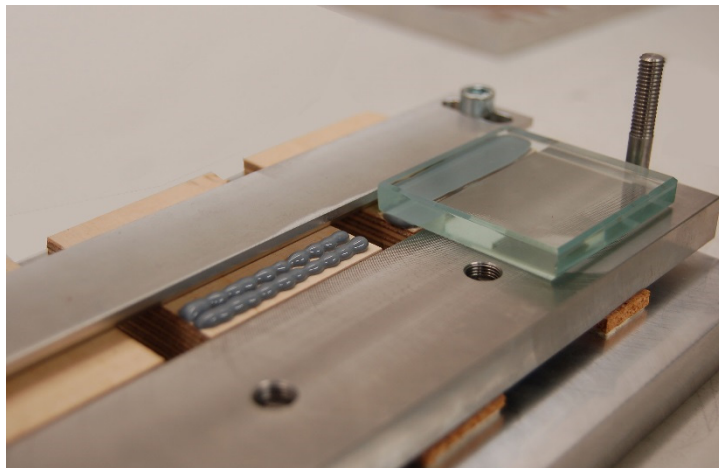
Die Scherprüfkörper werden in einer speziellen Vorrichtung (Bild 61) hergestellt. Die fertig zugeschnittenen Sperrholzstücke wurden zuvor für mindestens eine Woche unter konstanten Bedingungen²⁰⁰ in einem Klimaraum gelagert, damit

²⁰⁰ Das Raumklima lag konstant bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 80 \% rF . Das Normklima für Holzprüfungen ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 65 \% rF) konnte jedoch aufgrund einer Funktionsstörung des Klimagerätes nicht erreicht werden. Bei stichprobenartiger Überprüfung der Holzfeuchte ließ sich ein sehr ähnlicher Feuchtegehalt bei allen drei untersuchten Proben feststellen. Die Darrtrocknung der Proben nach DIN EN 13183-1 ergab eine mittlere Holzfeuchte von $10,4\text{ \%}$ (Vergleiche Aßmus 2012, S. 43 f.), die nur knapp über dem in der Literatur empfohlenen Maximalwert von $8\text{--}10\text{ \%}$ liegt (Vergleiche Habenicht 2006, S. 730). Die Randbedingungen sind für alle Prüfkörper der Serie identisch.

das Holz beim Verkleben einen einheitlichen Feuchtegehalt aufweist. Nach Entnahme wird die Holzoberfläche mit Druckluft gereinigt und von losen Partikeln befreit. Eine weitere Vorbehandlung erfolgt nicht. Die Glasoberfläche wird dagegen mit einem Lösungsmittelgemisch aus Isopropanol und Aceton entfettet. Die Klebung erfolgt einheitlich auf der Atmosphärenseite. Danach härten die Prüfkörper bei Raumtemperatur aus. Sobald die Handfestigkeit erreicht ist, werden die Proben wieder in den Klimaraum gebracht und dort gelagert, bis die Endfestigkeit der Klebung erreicht ist. Dabei werden dieselben Aushärtezeiten²⁰¹ eingehalten, wie sie für die Schulterstäbe schon festgelegt wurden. Die Scherversuche beginnen direkt nach Ablauf dieser Zeitspanne.

Bild 61

Kleben der Scherprüfkörper. Die berechnete Klebstoffmenge wird mit einer kleinen Spritze in Raupenform auf die Holzoberfläche appliziert. Danach wird die Glasplatte an der Aluminiumschiene, mit der man die Überlappungslänge exakt einstellen kann, ausgerichtet und vorsichtig angedrückt. Die gewünschte Klebfugendicke lässt sich vorher durch Stellschrauben stufenlos justieren. Die Prüfkörper bleiben bis zum Erreichen der Handfestigkeit in der Vorrichtung fixiert.



Bis auf den Silikonklebstoff aus der Gruppe A sind alle Klebstoffe Teil dieser Versuchsreihe. Silikone weisen allgemein eine sehr gute Haftung auf Holz- und Glasoberflächen auf.²⁰² Darüber hinaus setzt der Hersteller eines Fassadensystems in Holz-Glas-Verbundbauweise den Ottocoll S660 bereits in der Baupraxis ein.²⁰³ Für diesen Silikonklebstoff wird daher auf Scherversuche verzichtet.

²⁰¹ Als Ausnahme wurde nolax C44.8505 nach Rücksprache mit dem Hersteller bei 50 °C beschleunigt für 48 Stunden ausgehärtet. Vor der Prüfung lagerten die Proben mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur.

²⁰² Zahlreiche Forschungsarbeiten (Neubauer 2011, S. 86 ff., Edl 2008, S. 58 f. und Niedermaier 2005, S. 114) bestätigen ein gutes Haftvermögen von Silikonklebstoffen. Die Klebschichten versagten in der Regel kohäsiv.

²⁰³ Vergleiche UNIGLAS 2014, S. 11.

5.5 Versuchsergebnisse

5.5.1 Glasübergangstemperatur

Die Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse bei einer Frequenz von 1 Hz sind in Bild 62 bis Bild 64 dargestellt. Die Diagramme zeigen den Verlauf des Speichermoduls E' und des Verlustfaktors $\tan \delta$ als Funktion der Temperatur auf jeweils unabhängigen Skalen.²⁰⁴ Der Glasübergang lässt sich anhand eines deutlichen Steifigkeitsabfalls beim Speichermodul und anhand von Maxima im Kurvenverlauf des Verlustfaktors identifizieren. Der Beginn der Erweichung wird durch Extrapolieren der Tangenten ermittelt, die durch den Wendepunkt im abfallenden Kurventeil und den linearen Kurvenabschnitt bei Temperaturen unterhalb des Glasübergangs verlaufen. Der Schnittpunkt der beiden Tangenten wird als die Anfangstemperatur (Onset) T_{g0} definiert.²⁰⁵ Das hier gewählte logarithmische Auftragen des Speichermoduls ermöglicht eine gute Anpassung der Tangente, da der Kurvenverlauf in den Bereichen außerhalb des Glasübergangs dann häufig eine lineare Abhängigkeit zeigt. Man muss aber beachten, dass bei dieser Darstellungsform die Temperaturabhängigkeit nur scheinbar geringer ist.²⁰⁶ Eine obere Grenze markieren die Spitzenwerte auf dem Graphen des Verlustfaktors $T_g(\tan \delta_{\max})$. Die beschriebene Abgrenzung des Glasübergangsbereichs wird beispielhaft für den Klebstoff DELO-PUR 9895 in Bild 63 verdeutlicht. Die Grafik in Bild 65 fasst sämtliche Auswertungsergebnisse für die sieben untersuchten Klebstoffe zusammen.

Der untersuchte Silikonklebstoff offenbart ein für Elastomere typisches Materialverhalten. Im Einsatztemperaturbereich zwischen -20 °C und $+80\text{ °C}$ ist nur eine geringe Abhängigkeit der Steifigkeit von der Temperatur erkennbar (Bild 62). Das Material zeigt ein gummielastisches Verhalten. Die

²⁰⁴ Die Kurven stellen gemittelte Werte aus drei Messungen dar. Die Messkurven sind im Anhang A einzeln aufgeführt.

²⁰⁵ Das Verfahren wird u. a. in ASTM E 1640 und DIN 65583 beschrieben.

²⁰⁶ Beim linearen Auftragen des Speichermoduls tritt die Abhängigkeit von der Temperatur deutlicher in Erscheinung. Wegen des häufig nichtlinearen Kurvenverlaufs lässt sich die Tangente nur schwer anpassen und unterliegt subjektiver Einschätzung. Die Auswertung des stufenförmigen Modulabfalls (Onset) bei logarithmischer Skalierung führt zu höheren Werten für T_{g0} als die Auswertung linear aufgetragener Werte. (Vergleiche Ehrenstein 2003, S. 264 f.)

Kurve des Speichermoduls verläuft flach auf einem niedrigen Steifigkeitsniveau. Der Verlustfaktor ist ebenso gering, ein Zeichen für ausgeprägt elastisches Materialverhalten. Die Messkurven sind mit denen anderer Silikonklebstoffe für Structural-Sealant-Glazing-Fassaden vergleichbar.²⁰⁷ Der Glasübergang des Silikons Ottocoll S660 befindet sich offensichtlich bei einer tieferen Temperatur außerhalb des untersuchten Spektrums.²⁰⁸

Für die Klebstoffe mit mittlerer Steifigkeit ergeben sich dagegen sehr unterschiedliche Messkurven (Bild 63). Bei niedrigen Temperaturen weist das Polyurethan DELO-PUR 9895 die höchste Steifigkeit in dieser Gruppe auf, gefolgt von dem Acrylat SikaFast 5215. Die Polymerstruktur dieser beiden Klebstoffe beginnt jedoch bei etwas über 0 °C deutlich zu erweichen. Es bildet sich eine Stufe in den Speichermodulgraphen aus. Der Phasenübergang endet etwa bei der Temperatur, bei der der Verlustfaktor sein Maximum erreicht. Der Glasübergang erstreckt sich folglich bei SikaFast 5215 über einen größeren Temperaturbereich. Mit steigender Temperatur nimmt die Nachgiebigkeit dieses Klebstoffs dennoch weiter zu. Am Ende des Auswertebereichs liegt der Speichermodul schon deutlich unter 10 N/mm². Die Steifigkeit des Polyurethans ändert sich dagegen nach dem Glasübergang nicht mehr. Die Kurve des Speichermoduls bildet ein Plateau aus. Ein grundsätzlich anderes Messergebnis liefert die dynamisch-mechanische Analyse von nolax C44.8505. Bei tiefen Temperaturen liegt der Speichermodul des modifizierten Epoxidharzklebstoffs etwa eine Zehnerpotenz unter dem der beiden anderen Systeme. Das System ist folglich dort erheblich nachgiebiger. Der Kurvenverlauf zeigt dann aber keinen klar abgrenzbaren Glasübergang. Stattdessen nimmt die Steifigkeit über das gesamte Temperaturspektrum stetig aber nur mit einem geringen Gradienten ab. An der oberen Grenze des ausgewerteten Temperaturbereichs liegt die Steifigkeit sogar über der von SikaFast 5215.

²⁰⁷ Im Vergleich zu anderen Silikonklebstoffen für Fassaden (Dow Corning DC 993 und Sikasil SG500) ergeben sich für Ottocoll S660 ähnliche Messkurven in der DMA. (Vergleiche Weller 2013b, S. 56.)

²⁰⁸ Der Glasübergang von zwei vergleichbaren Silikonklebstoffen für den Fassadenbau liegt bei etwa -60 °C. Der Glasübergang wurde mit der DMA bestimmt. (Vergleiche Recknagel 2012, S. 419.)

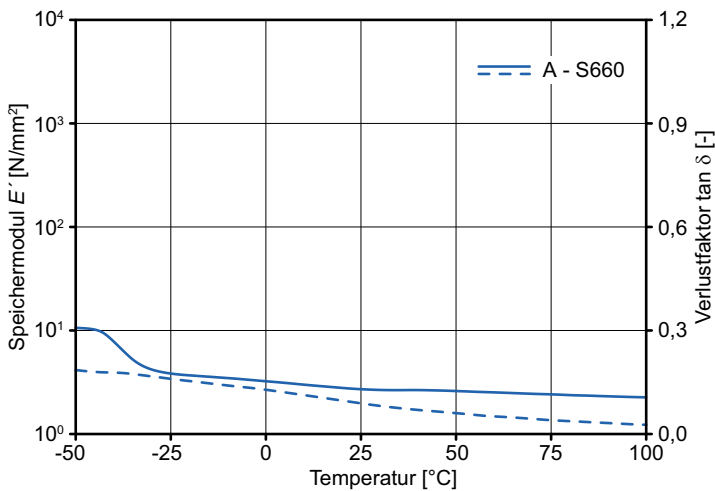


Bild 62

Ergebnisse der DMA bei 1 Hz am nachgiebigen Klebstoff vom Typ A (durchgezogene Linie: Speichermodul E' ; gestrichelte Linie: Verlustfaktor $\tan \delta$).

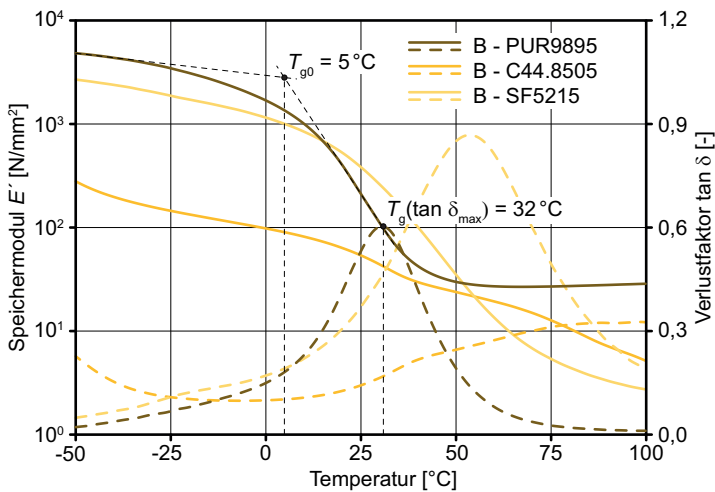


Bild 63

Ergebnisse der DMA bei 1 Hz an semi-elastischen Klebstoffen vom Typ B (durchgezogene Linie: Speichermodul E' ; gestrichelte Linie: Verlustfaktor $\tan \delta$). Die Ermittlung des Glasübergangsbereichs mittels Tangentenverfahren und anhand von Maxima ist beispielhaft an den Kurvenverläufen des Speichermoduls und des Verlustfaktors für den Polyurethanklebstoff DELO-PUR 9895 dargestellt.

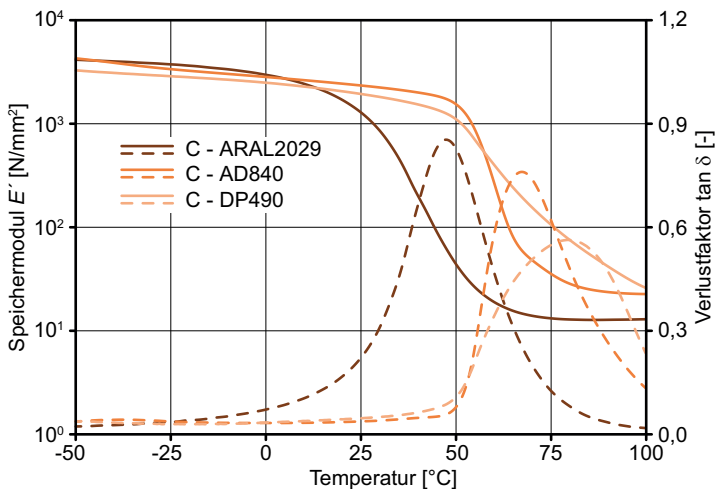


Bild 64

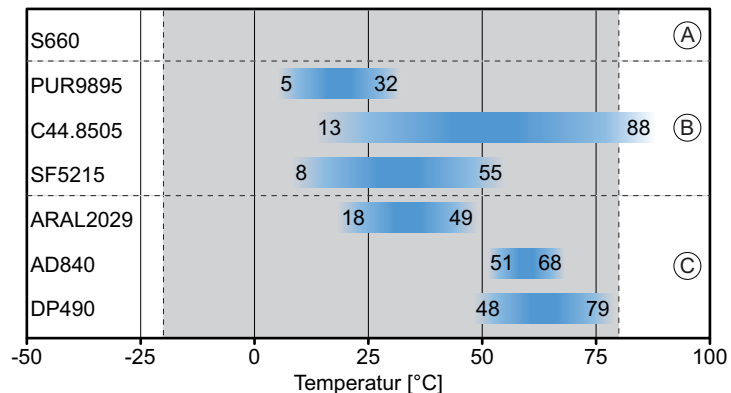
Ergebnisse der DMA bei 1 Hz an steifen Klebstoffen vom Typ C (durchgezogene Linie: Speichermodul E' ; gestrichelte Linie: Verlustfaktor $\tan \delta$).

Die Speichermodulkurven der steifen Klebstoffe verlaufen bei niedrigen Temperaturen auf einem einheitlichen Niveau (Bild 64). Erst wenn die Proben auf Raumtemperatur und darüber hinaus erwärmt werden, zeigen sich Unterschiede. Der Polyurethanklebstoff Araldite 2029 beginnt als erster zu erweichen. Die Anfangstemperatur (Onset) des Glasübergangs liegt bei knapp unter 20 °C. Die beiden auf einer Epoxidharzformulierung basierenden Klebstoffe zeigen dagegen erst ab einer Temperatur von etwa 50 °C einen erkennbaren Steifigkeitsabfall. Beim Klebstoff DELO-DUOPOX AD840 sinkt die Steifigkeit jedoch deutlich schneller ab als beim Klebstoff Scotch-Weld DP 490. Der Glasübergangsbereich lässt sich anhand der Funktion des Verlustfaktors bei allen drei Klebstoffen auch nach oben sehr gut abgrenzen. Am Ende der Erweichungsphase erreicht der Speichermodul bei allen drei Klebstoffen aus der Gruppe C Werte von mehr als 10 N/mm². Grundsätzlich weist die Mehrzahl der Klebstoffe, die in die Steifigkeitsklassen B und C eingruppiert wurden, auch bei Temperaturen oberhalb des Glasübergangs noch höhere Speichermodulwerte als der Silikonlebstoff auf.

Die Lage der ermittelten Glasübergänge zeigt Bild 65. Alle Messergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse werden dazu individuell ausgewertet und nachträglich gemittelt.

Bild 65

Temperaturbereiche des Glasübergangs für alle untersuchten Klebstoffe. Die Onsettemperatur T_{g0} markiert den Beginn. Der Maximalwert auf der Kurve des Verlustmoduls $T_g(\tan \delta_{\max})$ bildet den oberen Grenzwert. Der für Holz-Glas-Verbundelemente definierte Einsatztemperaturbereich ist grau hinterlegt.



Die Materialeigenschaften des Silikons Ottocoll S660 bleiben im vorgesehenen Einsatztemperaturbereich annähernd konstant. Die Klebstoffe DELO-PUR 9895 und Sika-Fast 5215 verlieren dagegen gerade bei Raumtemperatur deutlich an Steifigkeit. Der Beginn des Glasübergangs des zweiten Polyurethanklebstoffs Araldite 2029 liegt nur leicht darüber. Die hochfesten Epoxidharzklebstoffe DELO-

DUOPOX AD840 und Scotch-Weld DP 490 werden erst bei höheren Temperaturen deutlich nachgiebiger. Das Verhalten des silanterminierten Systems nolax C44.8505 weicht wiederum deutlich von dem aller anderen Klebstoffe in der Auswahl ab. Der Glasübergang erfasst nahezu den gesamten Einsatzbereich. Die Messwerte des Speichermoduls lassen jedoch erkennen, dass der Steifigkeitsverlust moderat ausfällt. Für eine abschließende Beurteilung müssen die Spannungs-Dehnungs-Beziehung und das Haftverhalten ausgewertet werden.

5.5.2 Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Die Steifigkeitsunterschiede der ausgewählten Klebstoffe zeigen sich auch im Verformungsverhalten unter einaxialer Zugbelastung. Bild 66 stellt die gemittelten Messwerte im unteren Dehnungsbereich für die Versuche bei Raumtemperatur und niedriger Belastungsgeschwindigkeit dar. Die in diesem und den nachfolgenden Diagrammen aufgetragenen nominellen Spannungen und Dehnungen beziehen sich auf den Anfangsquerschnitt des Prüfkörpers beziehungsweise auf die Messlänge am Beginn der Prüfung. Der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl werden deshalb im Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve berechnet.

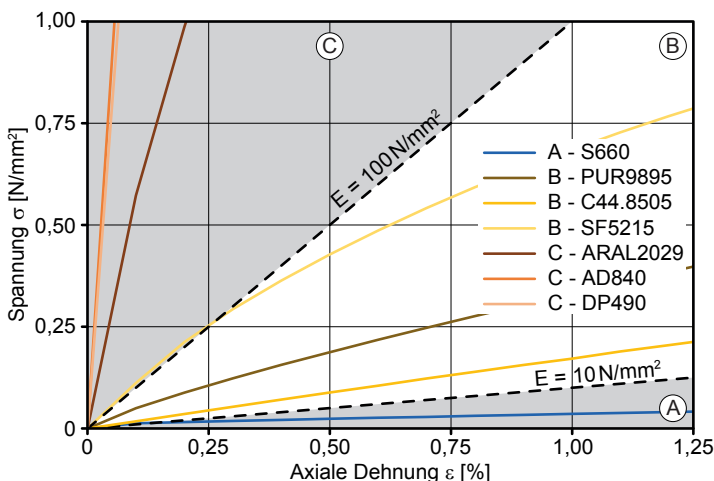


Bild 66

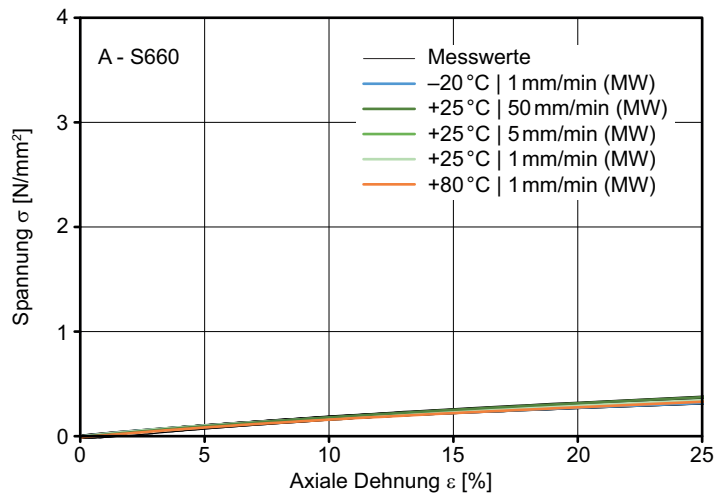
Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus einaxialen Zugversuchen unter Standardprüfbedingungen ($+25^\circ\text{C}$ | 1 mm/min). Dargestellt sind die Mittelwertkurven für die Klebstoffe der Vorauswahl und die zur Klassifikation der Klebstoffe festgelegten Grenzen des E-Moduls.

Die Graphen der beiden Epoxidharzklebstoffe vom Typ C verlaufen zu Beginn des Versuchs nahezu deckungsgleich. Der weniger steile Kurvenanstieg beim Polyurethanklebstoff Araldite 2029 weist auf eine etwas geringere Steifigkeit hin. Die Messwerte für die Klebstoffe mit mittlerer Steifigkeit verteilen sich über den gesamten Modulbereich B zwischen 10

und 100 N/mm^2 . Die Mittelwertkurve von SikaFast 5215 tangiert dessen obere Grenze, während sich die nachgiebigeren Klebstoffe DELO-PUR 9895 und nolax C44.8505 darunter einordnen. Erwartet flach verläuft die Kurve des Silikonklebstoffs Ottocoll S660. Die Messergebnisse decken sich mit der Eingruppierung in Tafel 5.

Die Resultate aus den weiteren Messreihen bestätigen die Erkenntnisse zum temperaturabhängigen Verhalten, das bereits anhand der dynamisch-mechanischen Analyse näher charakterisiert wurde. Die Diagramme in Bild 67 bis Bild 73 stellen individuell für jeden Klebstoff die Ergebnisse der axialen Dehnungsmessung in Relation zur Zugspannung dar. Die Kurven verlaufen nur in einem schmalen Streubereich. Die Messungen sind daher sehr gut reproduzierbar. Die Mittelwerte der einzelnen Prüflose sind farblich hervorgehoben.

Bild 67
Ottocoll S660 (Typ A),
Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.



Weder Temperatur noch Belastungsgeschwindigkeit beeinflussen das Materialverhalten von Ottocoll S660 (Bild 67) entscheidend. Unter allen Prüfbedingungen erreicht der Silikonklebstoff hohe Längsdehnungswerte. Die Spannungen bleiben jedoch gering. Bei allen anderen Klebstoffen – mit Ausnahme des silanterminierten Systems (Bild 69) – steigt bei tiefen Temperaturen die Steifigkeit signifikant an. Die Klebstoffe der Klasse C (Bild 71 bis Bild 73), die schon bei Raumtemperatur sehr starr reagieren, verspröden zunehmend und versagen, bevor sich ein Streckpunkt ausbilden kann. Bei den beiden Klebstoffen DELO-PUR 9895 (Bild 68) und SikaFast 5215 (Bild 70) bleibt jedoch auch bei -20 °C ein geringes Fließvermögen erhalten.

Mit steigenden Temperaturen werden die Klebstoffe nachgiebiger. Die Klebstoffe DELO-PUR 9895, SikaFast 5215 und Araldite 2029 erweichen zwischen dem Niedrigtemperatur- und Raumtemperaturversuch besonders stark. Die Klebstoffe DELO-DUOPOX AD840 und Scotch-Weld DP 490 verlieren erst zwischen Raumtemperatur und +80 °C signifikant an Steifigkeit. Dieses Verhalten korreliert mit den Glasübergangsbereichen in Bild 65. Alle getesteten Materialien offenbaren bei hoher Temperatur das nachgiebigste Verhalten in Relation zu den anderen Prüfvariationen.

Die Mehrzahl der getesteten Klebstoffe spricht steifer auf höhere Belastungsgeschwindigkeiten an. Die stärkste Abhängigkeit von der Dehnrates offenbaren SikaFast 5215 und Araldite 2029. Bei den Epoxidharzklebstoffen treten größere Bruchspannungen bei gleichzeitig geringeren Bruchdehnungen auf. Beim Klebstoff nolax C44.8505 ist die Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit gering. Das auch von der Temperatur nur moderat abhängige Spannungs-Dehnungs-Verhalten des silanterminierten Epoxidharzklebstoffs lässt sich nur bei entsprechender Skalierung der Spannungsachse erkennen (Bild 69).

Weitere Unterscheidungsmerkmale lassen sich in den Kurvenverläufen finden. Die Prüfbedingungen zur Bestimmung bestimmter Materialkennwerte sind abhängig von der Charakteristik der Spannungs-Dehnungs-Kurve.²⁰⁹ Unterschieden werden spröde Werkstoffe und dehnbare Werkstoffe mit und ohne Streckpunkt. Dieser kann nur beim Klebstoff Scotch-Weld DP 490 (Bild 73) eindeutig identifiziert werden. DELO-DUOPOX AD840, der sonst ähnliche Eigenschaften aufweist, zeigt keine klaren Fließverformungen. Eine Verstreckung wird im Ansatz nur bei einer niedrigen Dehnrates von 1 mm/min beobachtet. Alle anderen Klebstoffe zeigen bei Raumtemperatur einen Kurvenverlauf, der mit zunehmender Verformung immer flacher wird. Bei SikaFast 5215 und Araldite 2029 lässt sich sogar ein bilineares Spannungs-Dehnungs-Verhältnis ablesen.

²⁰⁹ Die Prüf- und Auswertennormen definieren verschiedene Kurventypen (DIN EN ISO 527-1, Bild 1 und DIN EN ISO 10350-1, Bild 1). Je nach Zuordnung werden unterschiedliche Prüfgeschwindigkeiten und Einpunktkennwerte vorgegeben. Die Kurvenbezeichnungen, die aus den Messergebnissen abgeleitet wurden, sind in Tafel 7 angegeben.

Bild 68
DELO-PUR 9895 (Typ B),
Spannungs-Dehnungs-Be-
ziehung im einaxialen Zug-
versuch für verschiedene
Temperaturen und Belas-
tungsgeschwindigkeiten.

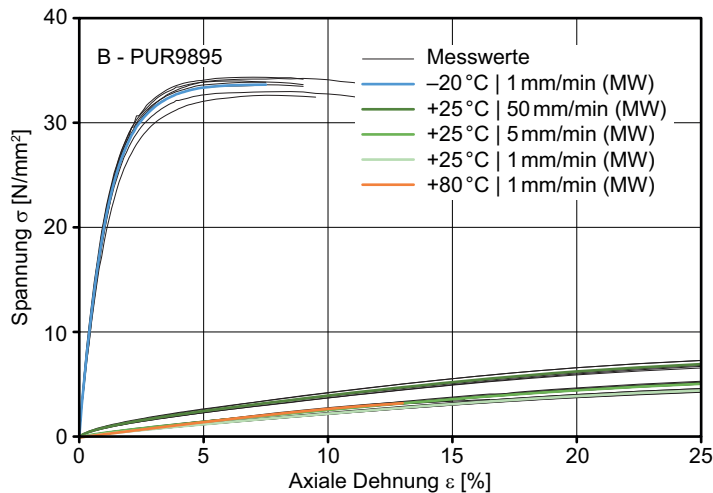


Bild 69
nolax C44.8505 (Typ B),
Spannungs-Dehnungs-Be-
ziehung im einaxialen Zug-
versuch für verschiedene
Temperaturen und Belas-
tungsgeschwindigkeiten.

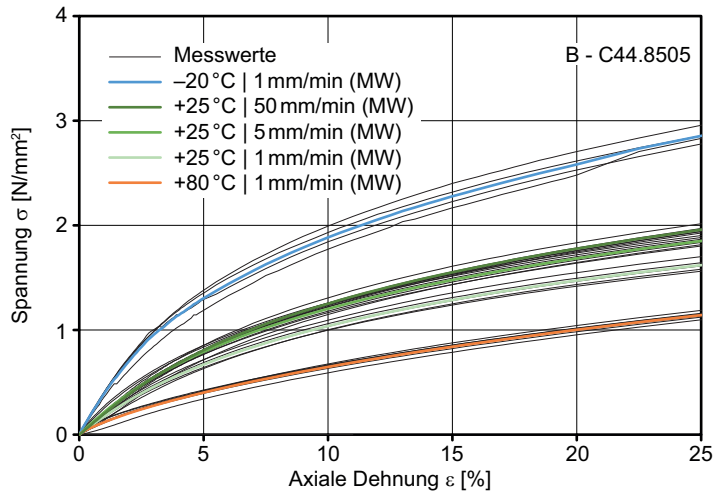
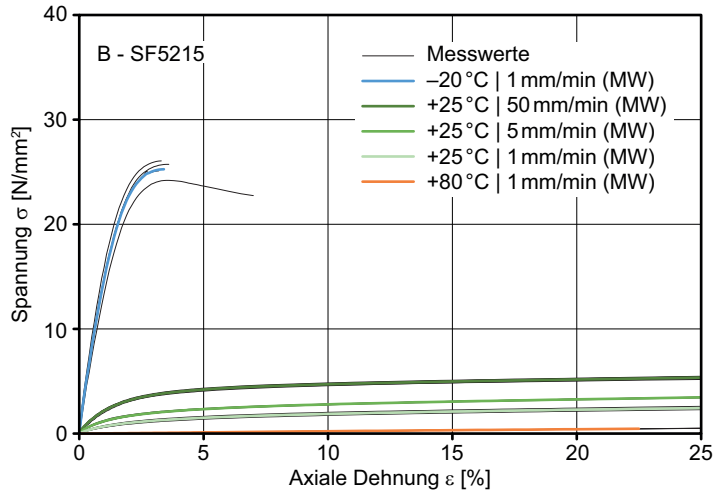


Bild 70
SikaFast 5215 (Typ B),
Spannungs-Dehnungs-Be-
ziehung im einaxialen Zug-
versuch für verschiedene
Temperaturen und Belas-
tungsgeschwindigkeiten.



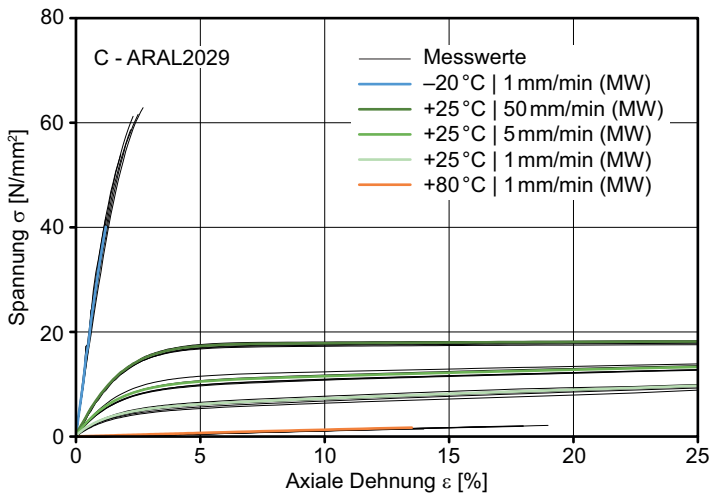


Bild 71

Araldite 2029 (Typ C), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.

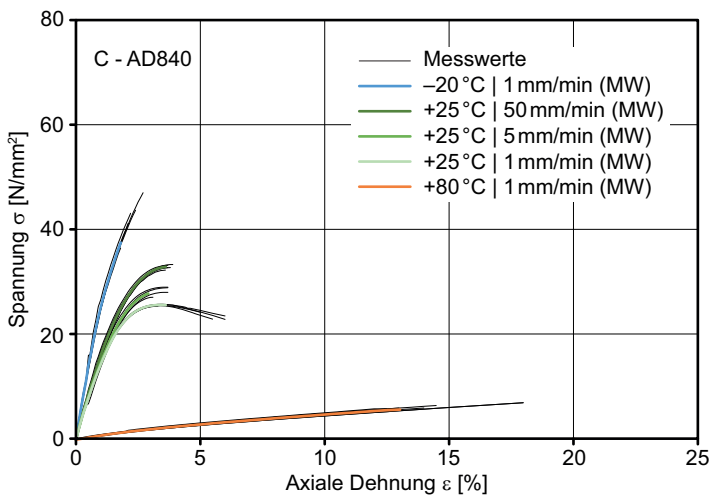


Bild 72

DELO-DUOPOX AD840 (Typ C), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.

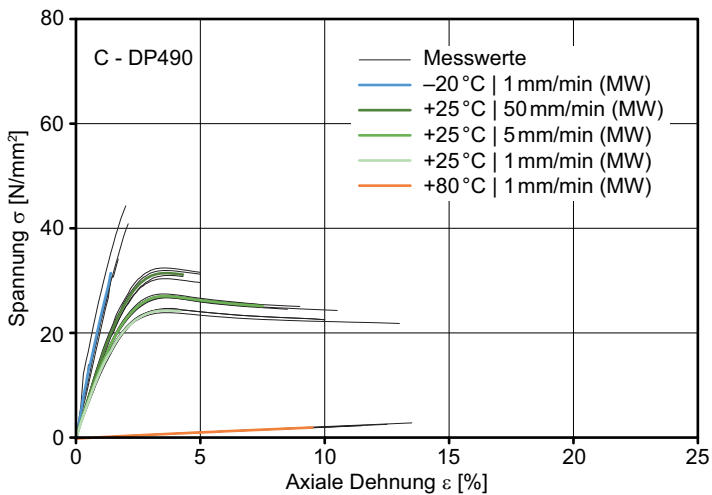


Bild 73

Scotch-Weld DP 490 (Typ C), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.

5.5.3 Einpunktkennwerte

Aus dem Zugversuch lassen sich mehrere Kenngrößen für den Vergleich der Materialien herleiten. Der Zugmodul gibt die lineare Steifigkeit der Klebstoffe bei kleinen Dehnungen an.²¹⁰ Zugmodul und Querdehnzahl können für Berechnungsmodelle von Klebschichten verwendet werden. Das Deformationsverhalten der Klebstoffe kann jedoch nur bei kleinen Dehnungen linear approximiert werden. Zu den weiteren Einpunktkennwerten zählen Streck- und Bruchspannungen sowie die zugehörigen Dehnungswerte.²¹¹ Die ermittelten Bruchwerte unterliegen einer erheblichen statistischen Streuung. Daher sind die Spannungen bei 50 % axialer Dehnung als allgemeiner Vergleichswert angegeben. Tafel 7 fasst die Mittelwerte zusammen.

An der oberen Temperaturgrenze weisen alle Klebstoffe den geringsten Zugmodul auf. SikaFast 5215 erreicht im Mittel nur noch einen Wert von $2,1 \text{ N/mm}^2$ und ist damit bei $+80 \text{ °C}$ genauso nachgiebig wie das Silikon Ottocoll S660. Bei allen anderen Klebstoffen der Gruppen B und C liegt die Steifigkeit um mindestens eine Zehnerpotenz darüber und damit noch im Zielbereich zwischen 10 und 100 N/mm^2 . DELO-DUOPOX AD840 weist die größte Steifigkeit im oberen Temperaturbereich auf, verhält sich bei Raumtemperatur jedoch sehr spröde. Ähnliche Dehngrenzen ergeben sich beim Klebstoff Scotch-Weld DP 490. Die restlichen Systeme sind dagegen erheblich dehnfähiger. Araldite 2029 erreicht bei einer Vergleichsdehnung von 50 % die höchste Spannung. Das Material vereint eine gute innere Festigkeit und ein hohes Deformationsvermögen. Die Bruchgrenzen von ausgehärteten Klebungen lassen sich daraus jedoch nicht ableiten. Hierzu werden die Scherversuche ausgewertet.

²¹⁰ DIN EN ISO 10350-1 definiert zur Bestimmung von Zugmodul und Querdehnzahl eine Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min . Der Zugmodul E_t entspricht der Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve zwischen 0,05 und 0,25 % axialer Dehnung. Der Kurvenanstieg wird an der Regressionsgeraden über alle Datenpunkte im betrachteten Dehnungsbereich bestimmt. Die Querdehnzahl μ wird auf gleiche Weise an der Quer-Längsdehnungs-Beziehung im Bereich zwischen 0,3 und 1,5 % Dehnung ermittelt.

²¹¹ Bei der Ermittlung von charakteristischen Kurvenmerkmalen gilt nach DIN EN ISO 10350-1, Bild 1 für spröde Werkstoffe (Kurventyp a) eine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min . Die anderen Klebstoffe (Kurventyp b bis e) werden mit 50 mm/min geprüft.

Klebstoff	Ottocoll® S660	DELO-PUR® 9895	nolax C44.8505	SikaFast® 5215	Araldite® 2029	DUOPOX® AD840	Scotch-Weld™ DP 490
Kurventyp ISO 10350-1	e	e	e	e	e	a	c
Zugmodul $E_{t,-20^{\circ}\text{C}}$	[N/mm ²] 3,1	[N/mm ²] 2406,8	[N/mm ²] 42,3	[N/mm ²] 1639,3	[N/mm ²] 3408,7	[N/mm ²] 2762,7	[N/mm ²] 2543,9
$E_{t,+25^{\circ}\text{C}}$	3,1	39,3	17,9	100,6	414,0	1639,8	1442,4
$E_{t,+80^{\circ}\text{C}}$	2,0	31,1	15,3	2,1	11,6	73,6	29,5
Querdehn- zahl μ	0,50 ^a	0,42	0,39	0,43	0,42	0,43	0,43
Streckpunkt $\sigma_y \mid \varepsilon_y$	–	–	–	–	–	–	31,5 N/mm ² 4 %
σ_{50}	0,6 N/mm ²	8,0 N/mm ²	2,6 N/mm ²	6,2 N/mm ²	18,8 N/mm ²	–	–
Bruch $\sigma_b \mid \varepsilon_b$	1,7 N/mm ² 165 %	9,3 N/mm ² 81 %	6,8 N/mm ² 236 %	9,7 N/mm ² 125 %	21,1 N/mm ² 82 %	28,2 N/mm ² 3 %	30,8 N/mm ² 5 %

^a Der berechnete Wert von $\mu = 0,52$ wurde korrigiert, da Querdehnzahlen $\mu > 0,5$ typischerweise nur bei porösen Materialien wie Holz auftreten. Der Fehler lässt sich auf Messungenauigkeiten zurückführen.

Tafel 7

Einpunktkennwerte nach
DIN EN ISO 10350-1 für die
Klebstoffe der Vorauswahl.

5.5.4 Scherfestigkeit und Bruchbildanalyse

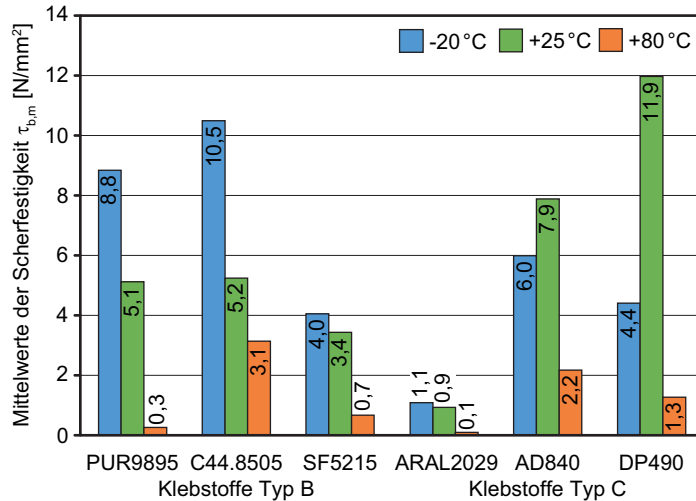
Das temperaturabhängige Verformungsverhalten der Klebstoffe spiegelt sich erwartungsgemäß in der Scherfestigkeit der Kleinteilproben (Bild 74) wider. Allerdings ergibt sich beim Vergleich der beiden Klebstoffgruppen ein differenziertes Bild. In der Gruppe der Klebstoffe mit mittlerer Steifigkeit steigt kontinuierlich die Festigkeit der Klebschicht, wenn die Temperatur absinkt. DELO-PUR 9895 und nolax C44.8505 erreichen mit etwa 9 bis 10 N/mm² die höchsten Werte an der unteren Grenze des Einsatztemperaturbereichs. Bei den steifen Klebstoffen kann ein solches Verhalten dagegen nur zwischen +80 °C und Raumtemperatur beobachtet werden. Bei Abkühlung auf Minusgrade nimmt die Beanspruchbarkeit offensichtlich durch Versprödung der Klebschicht wieder ab.

Bei Raumtemperatur weisen die zwei Epoxidharzklebstoffe DELO-DUOPOX AD840 und Scotch-Weld DP 490 die größte Scherfestigkeit auf. Die Festigkeit der Klebstoffe mit mittlerer Steifigkeit liegt einheitlich auf einem etwas niedrigeren Niveau. Araldite 2029 aus der Gruppe mit hoher Steifigkeit offenbart wiederum erhebliche Haftungsdefizite auf dem Sperrholz. Die Schubspannungen erreichen bei allen drei untersuchten Temperaturen kaum Werte über 1,0 N/mm².

Das ist ein deutlicher Unterschied zu den anderen Klebstoffen. Eine derart signifikante Abweichung war in Anbetracht der hohen Zugfestigkeit und des Verformungsvermögens, das im Zugversuch festgestellt wurde, nicht vorherzusehen.

Bild 74

Bruchfestigkeit der Scherprüfkörper. Das Diagramm zeigt die gemittelten Werte bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.



An der oberen Temperaturgrenze ist die Beanspruchbarkeit der Klebverbindungen am geringsten. Eine Korrelation von Klebstoffsteifigkeit und Scherfestigkeit ist hier allerdings nicht zu erkennen. Erstaunlicherweise fällt der Festigkeitsverlust bei nolax C44.8505 nicht so deutlich aus, wie bei den restlichen Systemen. Obwohl der silanmodifizierte Epoxidharzklebstoff die größte Nachgiebigkeit von allen Klebstoffen der Gruppen B und C aufweist, ergibt sich bei +80 °C eine mittlere Bruchspannung von 3,1 N/mm². Dieser Wert liegt klar über den Messergebnissen der anderen Klebstoffe. Die Polyurethane DELO-PUR 9895 und Araldite 2029 weisen bei +80 °C nur noch minimale Scherfestigkeiten auf.

Neben der nominellen Beanspruchbarkeit werden die korrespondierenden Bruchbilder ausgewertet. Kohäsive Brüche in der Klebschicht treten sehr selten auf und betreffen dann nur Teilbereiche der Klebung. Die Scherprüfkörper versagen in der Mehrzahl adhäsiv – entweder vollständig auf einer Füge-teiloberfläche oder in Kombination mit einem Substratbruch mit adhäsivem Versagen auf der gegenüberliegenden Substratoberfläche oder teilweise kohäsivem Versagen. Der Anteil an holzseitigen Adhäsionsbrüchen überwiegt. Der Klebstoff löst sich häufig nicht rückstandsfrei, da flüssige Bestandteile in die oberflächennahen Poren eingedrungen

sind. Dadurch entsteht neben den chemisch-physikalischen Adhäsionskräften auch eine formschlüssige Verankerung des Klebstoffs in der Holzstruktur.²¹² Glasbruch trat nur in einem Fall in Form von kleineren Kantenabplatzungen auf. Bei Sperrholzversagen reißen einzelne Fasern oder komplette Teile aus der oberen Furnierlage heraus. Bild 75 zeigt verschiedene Versagensmuster. Die Übersicht in Bild 76 stellt alle beobachteten Brüche im Zusammenhang dar.

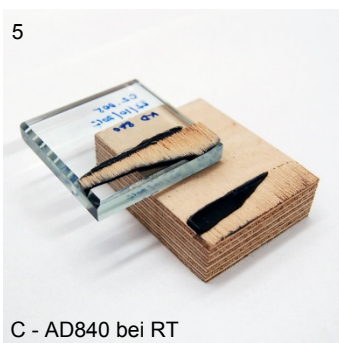
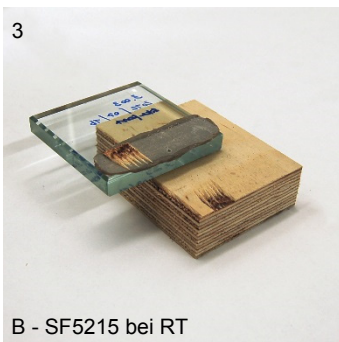
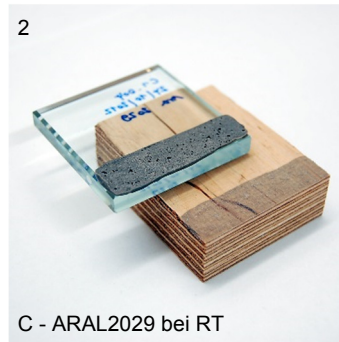
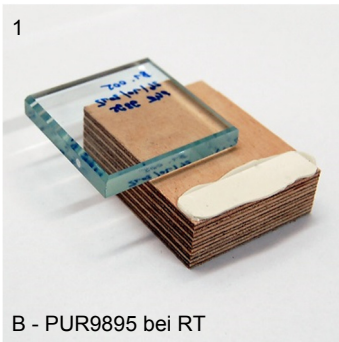


Bild 75

Beispiele typischer Bruchmuster im Scherversuch.

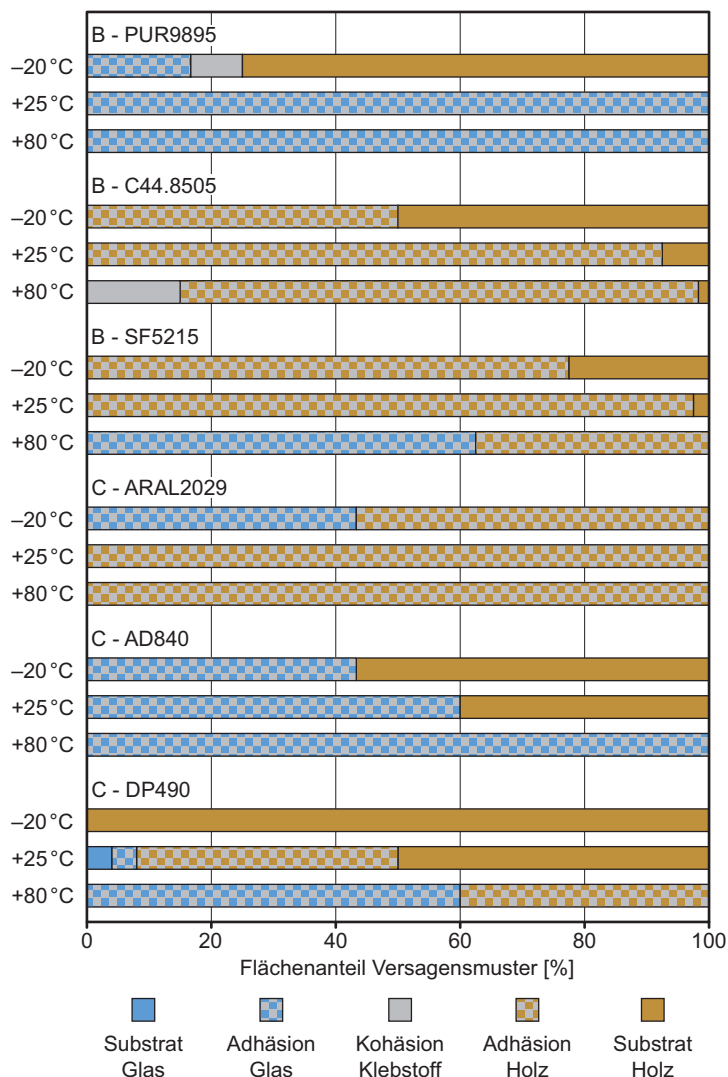
- 1 adhäsiver Bruch auf der Glasoberfläche
- 2 adhäsiver Bruch auf der Sperrholzoberfläche, es verbleiben sichtbare Rückstände im Holz
- 3 adhäsiver Bruch auf der Sperrholzoberfläche in Kombination mit einem Fügebruch durch Ausreißen von Holzfasern in der Decklage
- 4 adhäsiver Bruch auf der Holzoberfläche mit teilweise kohäsivem Versagen in der Klebschicht
- 5 teilweiser Substratbruch im Sperrholz in Kombination mit adhäsivem Versagen auf dem Glas
- 6 vollständiger Substratbruch im Sperrholz

Weitere charakteristische Bruchbilder sind nach Prüfbedingung geordnet in Anhang A dargestellt.

²¹² Dieser Effekt wird als mechanische Adhäsion bezeichnet. (Vergleiche Habenicht 2006, S. 293.)

Bild 76

Übersicht über das Bruchverhalten der Scherprüfkörper bei tiefen und hohen Temperaturen sowie bei Raumtemperatur. An jedem Prüfkörper wurde der Flächenanteil der fünf möglichen Brucharten bestimmt und anschließend jede Kategorie einzeln summiert. Die Anteile werden mit der Gesamtbruchfläche jeder Variation ins Verhältnis gesetzt. Die Vorgehensweise bei der Auswertung wird detailliert in Abschnitt 6.1.4 beschrieben.



Bei tiefen Temperaturen häufen sich die Fügeiteilbrüche im Holz. Da bei den steifen Klebstoffen DELO-DUOPOX AD840 und Scotch-Weld DP 490 die oberen Furnierschichten häufig sogar bei Raumtemperatur versagen, kann ein Zusammenhang zwischen Klebstoffsteifigkeit und Bruchmuster vermutet werden. Steife Klebschichten führen zu einer größeren Beanspruchung im Holz. Bei hohen Temperaturen lässt sich dagegen eine Tendenz zu adhäsivem Versagen auf der Glasseite ablesen. Der einzige Klebstoff, der keine Adhäsionsverluste auf der Glasseite zeigt, ist nolax C44.8505. Unter allen Prüfbedingungen versagt die Klebschicht auf der Holzseite – entweder durch Haftverlust oder Fügeiteilbruch oder bei +80 °C mit einem kohäsivem Anteil (Bild 75).

5.6 Klebstoffauswahl für die Hauptuntersuchungen

Insgesamt sieben Klebstoffsysteme werden im Rahmen der Vorversuche charakterisiert und die Materialeigenschaften für eine näherungsweise Berechnung der Klebschichten bestimmt. Abschließend wird ein Klebstoff je Steifigkeitsklasse für weiterführende Studien ausgewählt. Dabei kommt das System zum Einsatz, das die besten Eigenschaften beziehungsweise die größte Eignung in seiner Gruppe aufweist. Die folgenden Klebstoffe werden bei den Hauptversuchen berücksichtigt:

- A – Ottocoll S660
- B – nolax C44.8505
- C – Scotch-Weld DP 490

In Gruppe A, der Klasse der Klebstoffe mit großer Nachgiebigkeit, fand keine Auslese statt, da nur ein Silikonsystem untersucht wurde, das schon andere Forschungsarbeiten als geeignet eingestuft haben.

In Gruppe B lässt sich die Auswahl anhand der Versuchsergebnisse begründen. Alle drei Klebstoffe mit mittlerer Steifigkeit zeigen ein temperaturabhängiges Materialverhalten. Findet eine signifikante Änderung der Materialeigenschaften nahe der Raumtemperatur statt, wirkt sich das ungünstig auf die Anwendbarkeit des Klebstoffs aus. Für die Berechnung kann man nun gerade unter üblichen Nutzungsbedingungen nicht auf einheitliche Materialeigenschaften zurückgreifen. Die Klebstoffe DELO-PUR 9895 und SikaFast 5215 zeigen einen derart gelagerten Glasübergang. Ihre Anwendbarkeit ist dadurch nicht ausgeschlossen, aber durchaus eingeschränkt. nolax C44.8505 weist hier einen leichten Vorteil auf. Der Glasübergang lässt sich nicht klar abgrenzen und erstreckt sich über einen sehr großen Bereich. Die Steifigkeit nimmt aber kontinuierlich und in deutlich geringerem Umfang ab als bei den anderen beiden Klebstoffen. Den Ausschlag für die Entscheidung geben dann die Scherversuche. nolax C44.8505 erreicht unter allen Prüfbedingungen höhere oder ähnliche Maximalwerte wie die zwei anderen Systeme in der Gruppe. Beim Vergleich der Bruchwerte bei +80 °C liegt der Klebstoff sogar an der Spitze der gesamten Klebstoffauswahl. SikaFast 5215 verliert dagegen bei hohen Temperaturen sehr stark an Festigkeit. DELO-PUR 9895 lässt eine schlechte Haftung auf Glasoberfläche erkennen.

In Gruppe C fällt die Entscheidung vorrangig auf Basis der Scherversuche an kleinen Prüfkörpern. Aufgrund seiner unzureichenden Haftung auf der Sperrholz- und Glasoberfläche wird der Polyurethanklebstoff Araldite 2029 nicht für die weiteren Versuche ausgewählt, obwohl die dynamisch-mechanische Analyse und die Zugversuche durchaus vielversprechende Ergebnisse lieferten. Die Epoxidharzklebstoffe sind wesentlich leistungsfähiger und zeigen bei allen Charakterisierungsmethoden ein ähnliches Materialverhalten. Scotch-Weld DP 490 weist im direkten Vergleich bei Raumtemperatur das höhere Tragvermögen auf, DELO-DUOPOX AD840 dagegen bei tiefen und hohen Temperaturen. Ein Ergebnis, das sich mit den Beobachtungen im Zugversuch deckt. Die Entscheidung fällt zugunsten von Scotch-Weld DP 490, da sich der Klebstoff bei Raumtemperatur duktil verformen lässt. Ein derartiges Verformungsvermögen ist gerade in Verbundkonstruktionen von Vorteil, da Zwangsbeanspruchungen aus unterschiedlichen Längenänderungen der Füge Teile zum Teil kompensiert werden können.

Alle ausgewählten Klebstoffe eignen sich für tragende Klebverbindungen zwischen Holz und Glas. Die Ergebnisse aus den Vorversuchen lassen ein sehr gutes Tragverhalten unter kurzzeitigen Einwirkungen erkennen. Für eine endgültige Empfehlung müssen aber noch die Beständigkeit und das Kriechverhalten der Klebstoffe analysiert werden. Kapitel 6 und 7 widmen sich zusätzlichen experimentellen Kurz- und Langzeituntersuchungen, anhand derer sich das Tragverhalten von Klebschichten nach künstlicher Alterung und unter ständiger Beanspruchungen beurteilen lässt.

6 Experimentelle Untersuchungen an Klebverbindungen im Labormaßstab

6.1 Methodik

6.1.1 Untersuchungsgegenstand

Langandauernde Einwirkungen, denen eine Klebverbindung im Laufe ihrer Nutzungszeit ausgesetzt ist, können das Klebstoffgrundmaterial, die Grenzschicht am Übergang zur Füge-teiloberfläche und die Füge-teilbeschaffenheit selbst beeinflussen. Im Allgemeinen unterscheidet man in mechanische Beanspruchungen und in Beanspruchungen aus Umgebungsbedingungen.²¹³ Zu diesen Umwelteinflüssen zählen Temperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung – insbesondere deren ultravioletter Anteil sowie Wasser und weitere Schadmedien. In ihrer Wirkung werden diese Beanspruchungen gemeinhin als Alterung bezeichnet. Allein oder in Kombination mit mechanischen Einwirkungen können sie bei länger anhaltender Dauer die Verbindung schädigen.

Festigkeiten aus statischen Kurzzeitversuchen, wie sie für die Klebstoffauswahl und eine erste Charakterisierung im vorangegangenen Kapitel ermittelt wurden, genügen nicht, um die Eignung der Klebstoffe abschließend zu beurteilen. Es ist daher unerlässlich, den Einfluss langandauernder Beanspruchungen auf die ausgewählten Klebstoffe zu betrachten. Im Rahmen dieses ersten Teils der Hauptuntersuchungen sollen die Haftfestigkeiten vor und nach der Alterung der Klebverbindungen sowie nach längerer Einwirkung einer statischen Last bestimmt werden. Die Festigkeitsminderung gegenüber den ursprünglichen Werten kann beispielsweise als Grundlage für die Definition von Modifikationsbeiwerten dienen, mit denen sich das zeitabhängige Verhalten der Klebstoffe bei der Berechnung und dem Nachweis der Holz-Glas-Verbundelemente berücksichtigen lässt. Anhand des Verformungsverhaltens soll ein Verspröden oder Erweichen der Klebstoffe detektiert werden. Darüber hinaus geben sichtbare Verfärbungen des Klebstoffs oder Veränderungen im Bruchbild Aufschluss über eine bleibende Schädigung der Klebschicht. Die künstliche Alterung erfolgt an Prüfkörpern im Labormaßstab, da die Abmessungen der Klima- und Bewitterungskammern die Größe der Prüfkörper begrenzen.

²¹³ Vergleiche Habenicht 2006, S. 378 f.

6.1.2 Beurteilungsgrundlagen

Die Brauchbarkeit tragender Klebungen in Glasfassaden wird im Allgemeinen nach der Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (ETAG 002) beurteilt.²¹⁴ Die Leitlinie gilt jedoch nur für Sili-konklebstoffe und für ein beschränktes Spektrum an Klebuntergründen. Die darin beschriebenen Methoden und Nachweisverfahren werden dennoch auch auf abweichende Anwendungen übertragen, da in neuen Einsatzbereichen oft keine einheitlich geregelten Beurteilungsgrundlagen existieren. Die Richtlinie VE-08 des Instituts für Fenstertechnik in Rosenheim²¹⁵ greift die Grundsätze der ETAG 002-1 auf und stellt modifizierte Charakterisierungsmethoden für im Fensterbau übliche Materialkombinationen bereit, da sie speziell für geklebte Verglasungen in Fenstern ausgearbeitet wurde. In dieser Richtlinie lassen sich Vorgaben zur Prüfung von tragenden Klebverbindungen zwischen Holz und Glas finden. Die Anwendung der Richtlinien wird darüber hinaus in einem Merkblatt empfohlen, das im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsprojekts zu Holz-Glas-Verbundkonstruktionen entstand.²¹⁶

Teil 1 der ift-Richtlinie VE-08 widmet sich der Charakterisierung der Klebstoffe und legt Methoden zu deren Prüfung fest. Anhand der Ergebnisse kann die Dauerhaftigkeit der Klebverbindung beurteilt werden. Die Tragfähigkeit unter Zug- und Druckkräften, die Aussteifung des Fensterflügels und der Abtrag des Eigengewichts über die Klebung können auf Basis der im Laborversuch bestimmten Festigkeiten nachgewiesen werden. In Bezug auf die Beanspruchungsart und die möglichen Substratkombinationen bestehen enge Parallelen zwischen geklebten Holzfenstern und aussteifenden Fassadenelementen in Holz-Glas-Verbundbauweise. Das im Folgenden aufgestellte Untersuchungsprogramm und die Prüfkörpergeometrie der Kleinteilversuche orientieren sich daher an den Vorgaben dieser Richtlinie.

²¹⁴ Die baurechtlichen Zusammenhänge in Bezug auf diese Leitlinie wurden in Abschnitt 3.4.3 erläutert.

²¹⁵ Die ift-Richtlinie VE-08 „Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme“ erschien erstmals 2008 und wurde seitdem kontinuierlich ergänzt und mehrfach überarbeitet. Die letzte Fassung VE-08/3 stammt von August 2014.

²¹⁶ Das Merkblatt findet sich bei Hochhauser 2011a, S. 524 ff.

6.1.3 Untersuchungsprogramm

Das Vorgehen bei den experimentellen Untersuchungen an Kleinteilprüfkörpern gliedert sich in drei Stufen (Bild 77). Zuerst wird der Anfangswert der mechanischen Festigkeit bei Raumtemperatur und an der oberen und der unteren Grenze des Temperatureinsatzbereichs bestimmt. Dazu werden Scher- und Zugversuche durchgeführt. Die Werte dienen als Referenz, um eine mögliche Minderung der Klebschichtfestigkeit durch zeitabhängige Beanspruchungen bewerten zu können. Im zweiten Schritt wird die Klebschicht durch künstliche Alterung oder durch Kriechversuche vorbelastet. Die verschiedenen Szenarien werden dabei einzeln und nicht in Kombination geprüft. Nach dem jeweiligen Versuchsende wird die verbleibende Festigkeit an den mutmaßlich vorgeschädigten Prüfkörpern nach gleichem Prinzip wie zu Beginn ermittelt. Neben der Restfestigkeit und dem Verformungsverhalten lassen sich auch aus möglichen Farbveränderungen im sichtbaren Fugenbereich Aussagen zur Beständigkeit der Klebverbindungen ableiten.

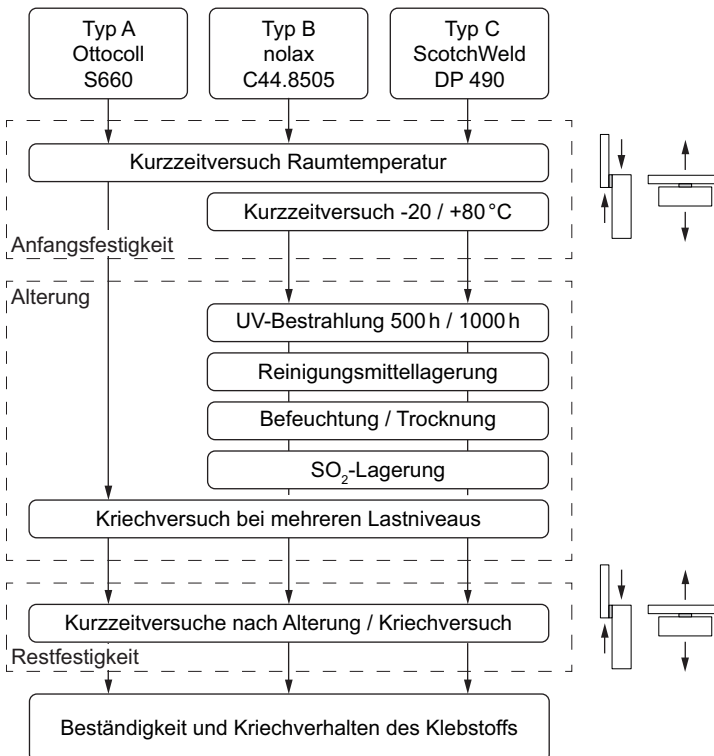


Bild 77
Hauptversuche an Prüfkörpern im Labormaßstab. Das Prüfprogramm orientiert sich an den Vorgaben der ift-Richtlinie VE-08/2. Die Klebstoffauswahl geht auf die Voruntersuchungen in Kapitel 5 zurück.

Die ift-Richtlinie VE-08 für geklebte Verglasungssysteme sieht vier auf Holzsubstrate angepasste Methoden zur Simulation der Umweltbeanspruchung vor: die UV-Bestrahlung, die Lagerung in Reinigungsmittellösung, Holzfeuchtwechsel und die Lagerung in einer schwefeldioxidhaltigen Atmosphäre.²¹⁷ Art und Intensität der Prüfung richten sich nach der Klebfugenposition. Wird die Verglasung außenseitig auf die Holzunterkonstruktion geklebt, ist die Fuge sehr stark dem Außenklima ausgesetzt.²¹⁸ Das Programm zur künstlichen Alterung wird daher vollständig umgesetzt.

Bei den Kriechversuchen wird allerdings von den Vorgaben der Richtlinie abgewichen. Der darin beschriebene Test dient lediglich dem Nachweis der Klebverbindung gegenüber einem festgelegten Grenzkriterium.²¹⁹ Die Dauerbelastung ist dabei eher gering. Um ein umfassenderes Bild vom Langzeittragverhalten der Klebschichten zu erhalten, werden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Laststufen untersucht, die zum Teil auch über den bekannten Grenzwerten liegen.

Die zwei härtesten Klebstoffe vom Typ B und Typ C durchlaufen das gesamte Programm. Versuchsreihen zur Dauerhaftigkeit des Silikonklebstoffs vom Typ A können dagegen entfallen, da hier bereits ausreichende Erkenntnisse aus anderen Forschungsarbeiten²²⁰ vorliegen. Die Studie bezieht weiterhin zwei unterschiedliche Holzarten – massives Kiefernvollholz (VH) und Birkenfurniersperrholz (BFU) – in die Prüfungen ein. Jede Prüfserie besteht aus zehn Prüfkörpern je Versuchsart, um die Ergebnisse statistisch auszuwerten und charakteristische Kennwerte zu berechnen. Die Serien zur UV-Bestrahlung und zum Holzfeuchtwechsel sind noch in zwei Untergruppen von je fünf Scher- und fünf Zugprüfkörpern unterteilt. Tafel 8 zeigt eine Übersicht zur

²¹⁷ Die hier geführte Beurteilung basiert auf der ift-Richtlinie VE-08/2 vom September 2011. Geringfügige Änderungen, die sich aus einer Novellierung im August 2014 ergaben, konnten nicht berücksichtigt werden.

²¹⁸ Verklebungsvarianten V7 oder V8 nach ift-Richtlinie VE-08/2, Bild A.1 und Tab. A.1.

²¹⁹ Die Klebfuge wird bei einer Temperatur von 55 °C mit 10 % der zulässigen Spannung beansprucht. Die bleibende Verformung darf nach Versuchsende (Belastungsdauer 91 Tage oder Verformungszunahme innerhalb von drei aufeinanderfolgenden Wochen < 0,1 mm) nicht über 1 mm liegen. (Vergleiche ift-Richtlinie VE-08/2, 1.3.)

²²⁰ Vergleiche Schober 2006 und 2007 und Neubauer 2011.

Anzahl der untersuchten Proben. Aus den zwei Beanspruchungsarten Scherung und Zug sowie den möglichen Materialkombinationen aus Klebstoff und Holzart ergibt sich bei einer Standardprüflosgröße von zehn Prüfkörpern eine Anzahl von 40 Scher- und 40 Zugprüfkörpern je Alterungsszenario. Bei den Kriechversuchen wurde der Versuchsumfang wegen der langen Prüfdauer auf insgesamt 20 Prüfkörper beschränkt. Einschließlich der Kriechversuche werden 620 Einzeltests durchgeführt. Neben der eingehenden Diskussion der Ergebnisse in diesem Kapitel erfolgt die abschließende Bewertung in Kapitel 8.

Versuchsbezeichnung	ID	Ottocoll® S660		nolax C44.8505		Scotch-Weld™ DP 490 ^a		Σ
		Glas	Glas	Glas	Glas	Glas	Glas	
		BFU	VH	BFU	VH	BFU	VH	
Anfangsfestigkeit bei Raumtemperatur	+25 °C REF	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	60/60
Kurzzeitfestigkeit bei hoher Temperatur (+80 °C)	+80 °C	–	–	10/10	10/10	10/10	10/10	40/40
Kurzzeitfestigkeit bei tiefer Temperatur (-20 °C)	-20 °C	–	–	10/10	10/10	10/10	10/10	40/40
UV-Bestrahlung bei erhöhter Temperatur – 500 h	UV1	–	–	5/5	5/5	5/5	5/5	20/20
UV-Bestrahlung bei erhöhter Temperatur – 1000 h	UV2	–	–	5/5	5/5	5/5	5/5	20/20
Lagerung in Reinigungsmittellösung	REI	–	–	10/10	10/10	10/10	10/10	40/40
Holzfeuchtewechsel bei +20 °C – Befeuchtung	FEU	–	–	5/5	5/5	5/5	5/5	20/20
Holzfeuchtewechsel bei +20 °C – Trocknung	TRO	–	–	5/5	5/5	5/5	5/5	20/20
Lagerung in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre	SO2	–	–	10/10	10/10	10/10	10/10	40/40
Kriechversuch Dauer 1000 h	KRI	8/–	–	10/–	–	2/–	–	20/–
Summe Prüfkörper je Materialkombination		18/10	10/10	80/70	70/70	72/70	70/70	

Angabe der Prüfkörperanzahl entsprechend der beiden Versuchsarten Scherversuch/Zugversuch

BFU: Furniersperrholz Birke

VH: Vollholz Kiefer

Tafel 8

Gesamtübersicht zum Versuchsprogramm und zur Probenanzahl.

6.1.4 Auswertungsmethoden

Die Bruchkräfte, die unter Schub- und unter Zugbeanspruchung experimentell ermittelt werden, stellen das wesentliche Messergebnis dieser Studie dar. Unter der vereinfachten Annahme einer konstanten Spannungsverteilung lassen sich daraus die nominellen Scher- beziehungsweise Zugfestigkeiten der Klebschichten berechnen. Die Mittelwerte X_{mean} jeder Serie dienen als entscheidender Vergleichswert für die Beurteilung der Festigkeitsverluste gegenüber dem Ausgangswert vor der Alterung. Auf Basis der Mittelwerte und der Standardabweichung einer Serie können weiterhin die charakteristischen Werte als 5-Prozent-Quantil der Bruchfestigkeit²²¹ nach Gleichung 16 berechnet werden:

Gleichung 16

$$R_{u,5} = X_{\text{mean}} - \tau_{\alpha\beta} \cdot \sigma_X$$

$R_{u,5}$	5-Prozent-Quantilwert der Bruchfestigkeit
X_{mean}	mittlere Bruchspannung der Versuchsreihe
$\tau_{\alpha\beta}$	Exzentrizität nach ETAG 002-1, Tab. 7
σ_X	Standardabweichung der Versuchsreihe

In den zugrundegelegten Richtlinien werden unterschiedliche Grenzwerte für den tolerierbaren Festigkeitsverlust definiert, wobei sich die Vergleiche in beiden Fällen auf die Mittelwerte der Prüferien beziehen. Gemäß ETAG 002-1 darf die mittlere Festigkeit sowohl unter erhöhter Temperaturbeanspruchung als auch nach der Alterung nicht unter 75 % der Anfangsfestigkeit aus der Prüfung bei Raumtemperatur sinken.²²² Der Bemessungswert der Zug- beziehungsweise der Schubfestigkeit wird dann auf Grundlage der charakteristischen Festigkeitswerte der ungealterten Proben und eines globalen Sicherheitsfaktors von $\gamma_{\text{tot}} = 6,0$ bestimmt.²²³ Im Gegensatz dazu erlaubt die ift-Richtlinie für geklebte Verglasungssysteme eine Festigkeitsminderung von bis zu 50 % des ursprünglichen Werts.²²⁴ In diesem Fall wird allerdings die geringste charakteristische Festigkeit nach Alterung

²²¹ Die charakteristische Festigkeit bestimmt sich als 5-Prozent-Quantil mit 75 % Aussagewahrscheinlichkeit. (Vergleiche ETAG 002-1, 6.1 und ift-Richtlinie VE-08/2, 1.1.)

²²² Vergleiche ETAG 002-1, Tab. 8.3.

²²³ Vergleiche ETAG 002-1, Anhang 2.

²²⁴ Vergleiche ift-Richtlinie VE-08/2, 1.3.

beim Bestimmen der Bemessungswerte herangezogen. Diese Grenzwerte werden im Rahmen der Arbeit als Anhaltspunkt für ein kritisches Alterungsszenario gewertet, aber nicht als generelles Ausschlusskriterium bei der Beurteilung der Brauchbarkeit der Klebstoffe angesehen.

Das Bruchmuster gilt ebenso als wichtiges Beurteilungskriterium. Die Flächenanteile der folgenden fünf grundlegenden Brucharten werden daher nach der mechanischen Prüfung in grober Näherung visuell bestimmt und ausgewertet:

- Substratversagen des Fügeteils aus Glas
- Adhäsionsversagen auf der Glasoberfläche
- Kohäsionsversagen in der Klebschicht
- Adhäsionsversagen auf der Holzoberfläche
- Substratversagen des Fügeteils aus Holz

Diese Auswahl orientiert sich an den Bruchbilddefinitionen in DIN EN ISO 10365. Auf eine Unterteilung in weitere Untergruppen wird dabei verzichtet, da die Vergleichbarkeit darunter leiden würde. Mischbrüche werden nach den jeweiligen Flächenanteilen der aufgetreten Hauptbrucharten berücksichtigt. Auf Besonderheiten, wie beispielsweise oberflächennahe kohäsive Brüche, die bei dieser groben Einteilung nicht darstellbar sind, muss allerdings gesondert hingewiesen werden.²²⁵ An jedem einzelnen Prüfkörper wird näherungsweise die Fläche jedes Bruchmustertyps bestimmt. Alle Anteile einer Versagensart in der Prüfserie werden addiert. Die Summe wird schließlich mit der Gesamtklebläche der Serie ins Verhältnis gesetzt. Daraus ergibt sich der prozentuale Anteil für jedes Bruchmuster.²²⁶

²²⁵ DIN EN ISO 10365 definiert zusätzlich zu Substratbruch, Adhäsionsbruch und Kohäsionsbruch eine weitere Bruchart – den substratnahen speziellen Kohäsionsbruch. Bei einem solchen Versagen verbleibt nur eine dünne Klebstoffschicht auf dem Fügeteil. Eine Unterscheidung zwischen Adhäsionsbruch und substratnahe Kohäsionsbruch ist bei Holz jedoch nicht zweifelsfrei möglich, da flüssige Klebstoffbestandteile in die poröse Holzoberfläche eindringen und nach dem Bruch fast immer ein Rest Klebstoff sichtbar ist (Bild 75). Zum besseren Verständnis werden hier diese Bruchmuster den Adhäsionsbrüchen zugeordnet.

²²⁶ Ein Beispiel zur Erläuterung: Ein Bruchanteil von 10 % in einer aus zehn Prüfkörpern bestehenden Serie kann entweder für die Beobachtung des Phänomens auf mehreren Prüfkörpern (Mischbruch) oder aber für ein einmaliges Auftreten an einem Prüfkörper (vollständiges Versagen nach dem betrachteten Bruchmuster) stehen.

Auch in Bezug auf das Bruchverhalten bestehen grundsätzliche Unterschiede zwischen den zitierten Richtlinien. Nach ETAG 002-1 müssen die Klebschichten zu mehr als 90 % kohäsiv versagen, damit die Nutzungssicherheit der Klebverbindung gegeben ist.²²⁷ Die ift-Richtlinie für geklebte Verglasungssysteme lässt für Klebungen auf Holz etwas mehr Spielraum. Zwar dürfen im Mittel auch nicht mehr als 10 % der Brüche adhäsiv sein, bei einzelnen Prüfkörpern ist dabei allerdings ein Anteil von bis zu 25 % zulässig.²²⁸ Die Forderungen nach einem nahezu vollständig kohäsiven Versagen wird jedoch von Brockmann in Zusammenhang mit steifen und dünnen Klebschichten kritisiert.²²⁹ Die hier geführte Beurteilung konzentriert sich daher auf Änderungen im Bruchmuster als Indikator für kritische Alterungsbedingungen.

6.2 Geometrie und Herstellung der Prüfkörper

6.2.1 Prüfkörper zum Bestimmen der Haftfestigkeit vor und nach künstlicher Alterung

In den Hauptversuchen wird sowohl die Scher- als auch die Zugfestigkeit der Klebverbindung ermittelt. Die Geometrie und die Abmessungen der Prüfkörper (Bild 78) leiten sich aus bekannten Prüfkörpervarianten zur Untersuchung von Holz-Glas-Klebungen ab.²³⁰ Die Klebfläche entspricht mit den Abmessungen von 12 x 50 mm den Vorgaben aus der ift-Richtlinie²³¹ für geklebte Verglasungssysteme. Bei beiden Prüfkörperversionen ist die Fuge 3 mm dick.

Die Kante der Fügeteile aus Glas wird im Gegensatz zu den Prüfkörpern aus den Vorversuchen ohne Fase ausgeführt. Die Kantenflächen sind auf Maß geschliffen. Somit lässt sich

²²⁷ Vergleiche ETAG 002-1, 6.1 und Tab. 8.3.

²²⁸ Vergleiche ift VE-08/2, 1.3

²²⁹ Vergleiche Brockmann 2005, S. 132 f.

²³⁰ Ähnliche Zugprüfkörper wurden beispielsweise von Niedermaier (2005, S. 89) und Neubauer (2011, S. 38) verwendet. Die Geometrie basiert auf dem H-Prüfkörper aus ETAG 002-1 und findet sich in ähnlicher Form auch in der ift-Richtlinie VE-08/2. Für die Scherversuche wird in den genannten Arbeiten der gleiche Prüfkörpertyp genutzt. Hier wird dagegen der von Blyberg (2012) entwickelte Scherprüfkörpertyp bevorzugt, da sich damit Normalspannungen in der Klebschicht vermindern lassen. Die Prüfvorrichtung (Bild 60) erlaubt eine nahezu biegemomentfreie Einleitung der Schubkraft in die Klebschicht.

²³¹ Vergleiche ift-Richtlinie VE-08/2, Bild 3.

eine exakt definierte Klebschicht herstellen, was eine Verbesserung gegenüber den Vorversuchen darstellt. In dieser Ausführung ist die Glasfestigkeit jedoch geringer, da Gläser ohne Fase nicht thermisch vorgespannt werden können, ohne dass es zu Abplatzungen kommt. Die präzise zugeschnittenen Holzteile bestehen entweder aus Birkenfurniersperrholz oder alternativ aus Kiefernvollholz.²³²

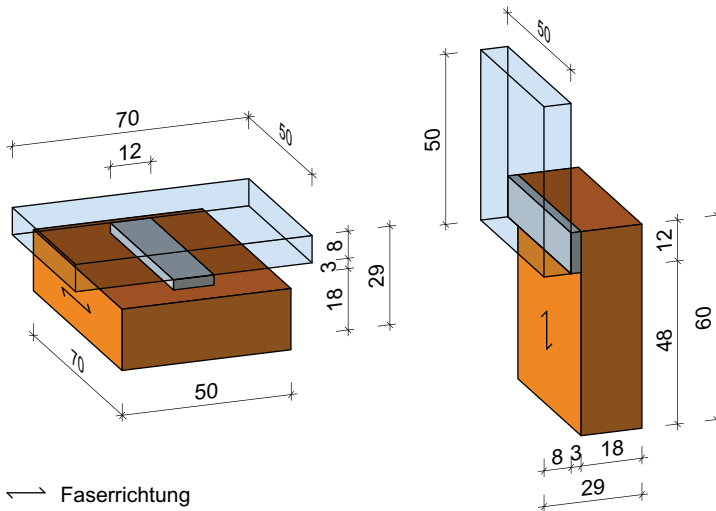


Bild 78
Geometrie und Abmessungen der Zug- und Scherprüfkörper. In den Hauptversuchen im Labormaßstab wird die Klebfugendicke gegenüber den Vorversuchen von 1 auf 3 mm erhöht, da damit die Klebschichten aus den drei unterschiedlichen Klebstoffsystemen in einer einheitlichen Dicke ausgeführt werden können. Beim Zugprüfkörper (modifizierter H-Prüfkörper) sind die Fasern in der Holzoberfläche parallel zur Klebfuge ausgerichtet. Beim Scherprüfkörper verlaufen sie in Wirkungsrichtung der Scherkraft.

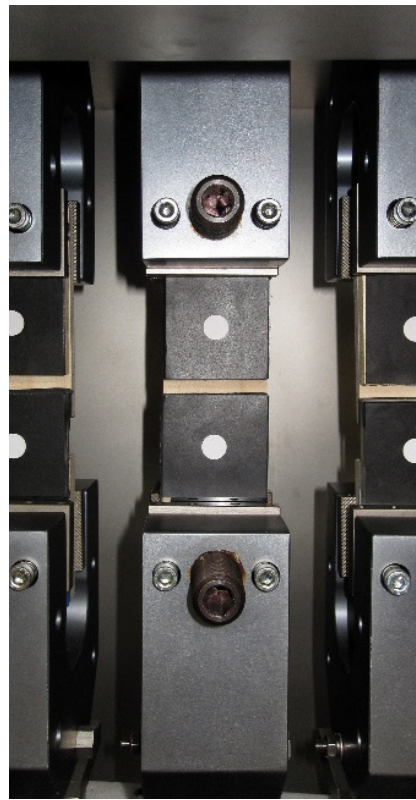
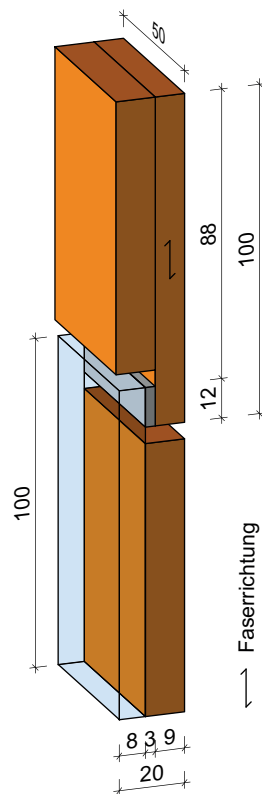
6.2.2 Scherprüfkörper für Kriechversuche

Der Prüfkörper für die Kriechversuche unterscheidet sich von den regulären Scherprüfkörpern. Der Einbau einer speziellen Schervorrichtung ist aufgrund der Spannbackenform in der Zeitstandanlage nicht möglich. Die Geometrie des Prüfkörpers wird daher modifiziert. Seine Form orientiert sich an der Zugscherprobe nach ISO 11003-2 (Bild 79). Durch die annähernd symmetrische Form und die zentrische Krafteinleitung kann eine nahezu reine Schubbeanspruchung in der Klebschicht erzeugt werden. Die Abmessungen entsprechen allerdings nicht den Werten aus dieser Norm, sondern basieren auf dem Scherprüfkörper aus Bild 78. Die Klebfläche und die Schichtdicke sind identisch. Die Glasqualität bleibt ebenso gleich. Auf der Holzseite wird hingegen ausschließlich Birkenfurniersperrholz verwendet, da die Holzart zwar die Haftung beeinflussen kann, aber mutmaßlich keinen großen Einfluss auf die Kriechverformungen hat.

²³² Die Fügeteilmaterialien und deren Eigenschaften wurden ausführlich in Abschnitt 2.1 beschrieben.

Bild 79

Geometrie, Abmessungen und Versuchsanordnung des Scherprüfkörpers für die Kriechversuche. Die Füge-teile aus Glas und Birkenfurniersperrholz weisen die gleiche Dicke auf, damit die Klebfuge zentrisch in der Zugachse liegt. Das Ende der Prüfkörper ist in den Klemmbereichen mit Holzklotzen verdickt. Das Glas wird zusätzlich durch ein Kunststoffplättchen vor Kontakt mit der Spannbacke geschützt. Auf der Prüfkörperoberfläche befinden sich Messmarken, die von der Kamera der Zeitstandanlage erfasst werden können. Die Mittelpunkte der Messmarken haben einen Abstand von etwa 60 mm. Der exakte Abstand wird vor Versuchsbeginn durch das Messsystem erfasst.



6.2.3 Vorbereiten und Konditionieren der Proben

Sämtliche Holzproben werden vor dem Verkleben auf eine einheitliche Feuchte gebracht. Dazu lagern die fertig zugeschnittenen Füge-teile bei +20 °C und 65 % rF in einem Klimaraum. Unter diesen Bedingungen stellt sich eine Ausgleichsfeuchte von 12,7 % im Kiefernvollholz und von 11,3 % im Birkenfurniersperrholz ein. Die Holzoberflächen werden nur mit Druckluft gereinigt und ansonsten nicht weiter vorbehandelt. Die Glasoberfläche wiederum wird wie schon bei den Kleinteilproben aus den Vorversuchen mit fusselfreien Tüchern und Lösungsmittel (Isopropanol) gereinigt.

Die Zugprüfkörper werden mithilfe spezieller Schablonen aus Polyethylen (PE) hergestellt. Nachdem die Füge-teile aus Holz auf der Grundplatte fixiert sind, werden die Schablonen aufgelegt. Darüber platziert man die gereinigte Glasplatte (Bild 80). Die Atmosphärenseite zeigt zur Klebschicht. Wenn alle Einzelteile exakt ausgerichtet sind, wird eine Klemmleiste montiert, die beim Klebvorgang alles in Position hält. Nach dem Einspritzen des Klebstoffs wird das überschüssige Material abgezogen und die Fuge geglättet.

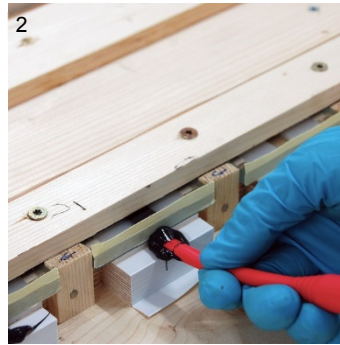
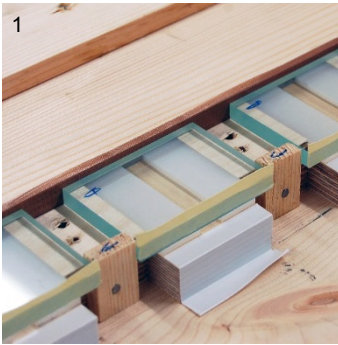


Bild 80

Herstellen der Zugprüfkörper in der Klebvorrichtung.

- 1 Vor dem Kleben – Die Schablonen dienen als Abstandhalter und Form für die Klebschicht.
- 2 Klebvorgang – Das Klebstoffgemisch wird mit einer flexiblen Kartuschenspitze in die Öffnung injiziert.

Bei den Scherprüfkörpern musste das für die Vorversuche verwendete Herstellverfahren überarbeitet werden, damit eine größere Stückzahl parallel hergestellt werden kann. Mehrere Prüfkörper werden nun in Reihe nebeneinander angeordnet und kontinuierlich verklebt. Dünne Stege aus Polytetrafluorethylen (PTFE) trennen die einzelnen Proben voneinander (Bild 81). Zuerst werden die Glasplatten eingebaut und an einer mit PTFE-Folie ummantelten Leiste ausgerichtet. Dann folgen die Füge Teile aus Holz, die auf diese Leiste aufgeschraubt werden. Die Fuge wird nach dem Zusammenbau mit Klebstoff gefüllt und mit einer Rakel final abgezogen.

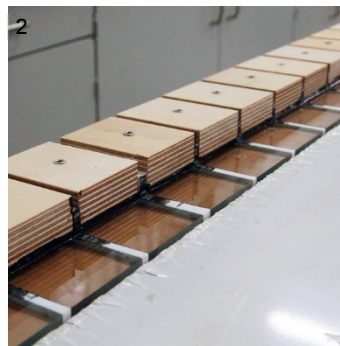
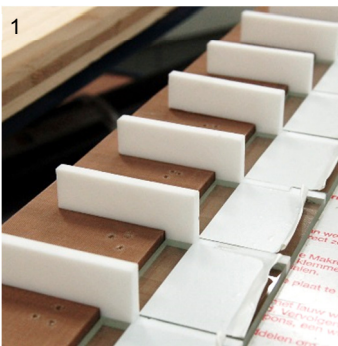


Bild 81

Herstellen der Scherprüfkörper in der Klebvorrichtung.

- 1 Vor dem Einsetzen der Füge Teile aus Holz – Die Glasplatten sind durch Trennstege separiert. Die Anschlagleiste definiert auch die Fugendicke.
- 2 Nach dem Kleben – Die Prüfkörper bleiben bis zum Erreichen der Handfestigkeit fixiert.

Die Herstellung der Scherprüfkörper für die Kriechversuche erfolgt auf gleiche Weise wie zuvor beschrieben. Die zusätzlichen Teile an den beiden Enden des Prüfkörpers werden erst nach dem Aushärten der Klebschicht ergänzt und mit den eigentlichen Füge Teilen starr verklebt.

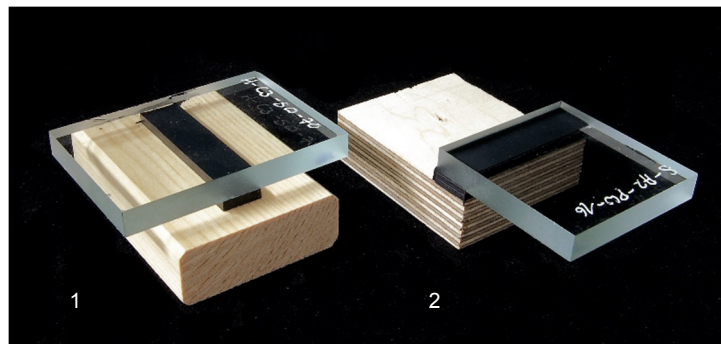
Nach etwa einem Tag sind die Proben handfest und können aus der Herstellvorrichtung ausgebaut werden. Mit den entwickelten Klebvorrichtungen ließen sich sehr maßhaltige Klebschichten herstellen (Bild 82), sodass von einer guten Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse ausgegangen

werden kann. Bis zur vollständigen Aushärtung lagern sämtliche Proben dann wieder bei den gleichen Bedingungen im Normalklimaraum (+20 °C und 65 % rF). Dabei werden die Aushärtedauern eingehalten, die der jeweilige Hersteller vorgibt (Tafel 5). Die Prüfkörper werden erst unmittelbar vor Beginn der Prüfungen aus der Klimakammer entnommen. Die Versuche bei hoher oder tiefer Temperatur erfordern jedoch zusätzlich eine Vortemperierung für 24 ± 4 Stunden bei +80 °C beziehungsweise -20 °C. Die Bedingungen für die Konditionierung zwischen künstlicher Alterung und mechanischer Prüfung richten sich dagegen nach dem jeweiligen Prüfzenario. Entsprechende Angaben sind in den Abschnitten 6.3.2 bis 6.3.5 zu finden.

Bild 82

Zug- und Scherprüfkörper
nach der Aushärtung.

- 1 Vollholz/SW DP 490
- 2 Sperrholz/Ottocoll S660



6.3 Verfahren zur mechanischen Prüfung und zur künstlichen Alterung

6.3.1 Zug- und Scherversuche

Die Festigkeit der Klebverbindungen wird unter Schub- und unter Zugbeanspruchung untersucht. Das elektromechanische Prüfsystem (Instron 8851) verfügt über eine Temperierkammer für die Prüfungen bei -20 °C und +80 °C. Der Prüfaufbau für die Scherversuche ist identisch mit dem der Vorversuche. Die Scherversuche und die entsprechende Prüfvorrichtung sind in Abschnitt 5.4.3 ausführlich beschrieben. Auf eine erneute Darstellung wird daher verzichtet.

Bild 83, links zeigt die Zugvorrichtung zur Aufnahme der modifizierten H-Prüfkörper. Zwei identische Haltewinkel, die mit einer Grundplatte verschraubt sind, umgreifen das Füge­teil aus Holz beziehungsweise auf der gegenüberliegenden Seite dasjenige aus Glas. Genau wie die Substrate sind die Haltevorrichtungen um 90° gegeneinander verdreht. Die Traverse bewegt sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von

1 mm/min nach oben – solange bis der Prüfkörper versagt.²³³ Vor dem Start wird eine Vorkraft von etwa 15 N aufgebracht, um das Spiel in der Kraftmesskette zu reduzieren und einen festen Sitz der Haltewinkel zu erreichen. Der obere Winkel verdeckt die Klebfuge. Daher lassen sich die Verformungen nicht per Videoextensometer aufzeichnen. Im Zugversuch werden daher ausschließlich die Prüfkraft und der Traversenweg erfasst. Bei sehr kleinen Verformungen wirkt sich die Längenänderung der Kraftmesskette deutlich auf das Messergebnis aus und muss berücksichtigt werden.

Eine Ausnahme bilden die Scherversuche, die im Anschluss an die Kriechprüfung durchgeführt werden. Die dicken Zugscherprüfkörper werden mittels Schraubspannzeugen in der Prüfmaschine fixiert (Bild 83, rechts). Dabei muss auf eine möglichst zentrische Ausrichtung des Prüfkörpers zwischen den parallelen Spannbacken geachtet werden. Die Vorkraft in den Scherversuchen beträgt einheitlich 50 N. Es wird die gleiche Prüfgeschwindigkeit wie bei den Zugversuchen verwendet. Aufgrund der freien Sicht auf den Prüfkörper kann das Videoextensometer in diesem Fall die Verformungen gut anhand von Markierungen erfassen.

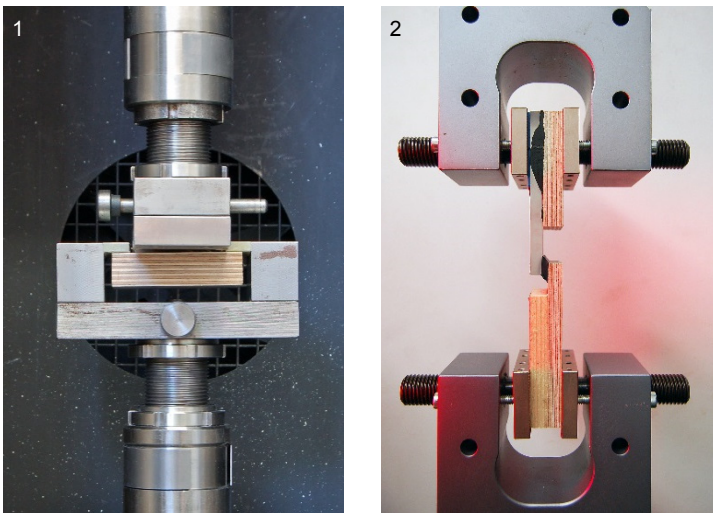


Bild 83

Vorrichtungen für die mechanische Prüfung des Haftvermögens und der Festigkeit der Klebschichten im Labormaßstab.

- 1 Zugvorrichtung für den modifizierten H-Prüfkörper
- 2 Schraubspannzeuge mit eingespanntem, dicken Zugscherprüfkörper aus dem Kriechversuch

Die Schervorrichtung für die Kurzzeitversuche an den künstlich gealterten Proben ist identisch zu den Vorversuchen (Bild 60).

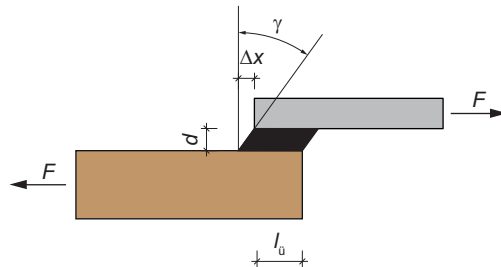
²³³ ETAG 002-1, 5.1.4.1 gibt eine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min vor. Da diese Angabe sich aber auf eine wesentlich größere Fugendicke von 12 mm bezieht, wird im Rahmen der hier geführten Versuche eine geringere Prüfgeschwindigkeit gewählt. Mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min erreicht man bei 3 mm Fugendicke ähnliche Dehnraten wie in der ETAG 002-1 vorgesehen sind.

Das berührungslose Messen der Relativverschiebung der Fügeteile in unmittelbarer Nähe zur Klebschicht ermöglicht die zusätzliche Auswertung des Verformungsverhaltens. Die Gleitung $\tan \gamma$ wird nach der Beziehung in Bild 84 aus der Verschiebungsdifferenz der Messpunkte Δx und der Dicke der Klebfuge bestimmt. Bei sehr steifen Klebschichten treten jedoch nur geringe Verformungen auf. Die Messwerte sind dadurch störanfälliger und nicht immer eindeutig auswertbar.

Bild 84

Mechanische Zusammenhänge im Scherversuch.

d, b, l_0	Abmessungen der Klebfuge
Δx	Verformung
γ	Scherwinkel
$\tan \gamma$	Gleitung
τ	Schubspannung
G	Schubmodul



$$\tan \gamma = \frac{\Delta x}{d}$$

$$\tau = \frac{F}{l_0 \cdot b}$$

$$G = \frac{\tau}{\tan \gamma}$$

6.3.2 Lagerung unter UV-Bestrahlung

Die künstliche Alterung unter ultravioletem Licht (UV) stellt eine wichtige Prüfung für Klebverbindungen in der Fassade dar. Wie hoch die Beanspruchung in der Realität ist, hängt stark von der Lage der Klebfuge im Fassadenquerschnitt ab. Daher gibt die Prüfrichtlinie die Bestrahlungsdauer in Abhängigkeit von der Klebfugenposition und von Maßnahmen vor, mit denen die Klebfuge vor direkter Bestrahlung geschützt werden kann.²³⁴ Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Teil der Prüfkörper nach 500 Stunden, der andere nach 1000 Stunden künstlicher Bewitterung untersucht. Die Prüfung erfolgt laut ift-Richtlinie für Holz-Glas-Verbindungen ohne Wassereinfluss.²³⁵ Die Glasseite der Prüfkörper zeigt nach oben (Bild 85). Die Temperatur des Probenraums wird während der gesamten Bestrahlungszeit konstant auf $+60 \pm 5 \text{ °C}$ gehalten. In Probenebene beträgt die Bestrahlungsstärke $\text{UVA} = 50 \text{ W/m}^2$.

²³⁴ Die Klebfuge befindet sich bei den betrachteten Holz-Glas-Verbundelementen auf einer Position (Varianten 7 | 8 nach ift-Richtlinie VE-08/2, Bild A.1 und Tab. A.1), die direkter UV-Bestrahlung ausgesetzt ist. Gemäß ift-Richtlinie VE-08/2, Tab. 1 und Tab. A.2 beträgt die Bestrahlungsdauer daher 1000 Stunden (Prüfung 3b). Bei Schutz der Klebschicht durch einen keramischen Siebdruck auf der Glasoberfläche genügt eine Bestrahlungsdauer von 500 Stunden (Prüfung 3a).

²³⁵ Vergleiche ift-Richtlinie VE-08/2 Tab. 1 (Prüfung 3a/b). Modifizierter Bestrahlungsversuch nach ETAG 002-1 5.1.4.2.1.

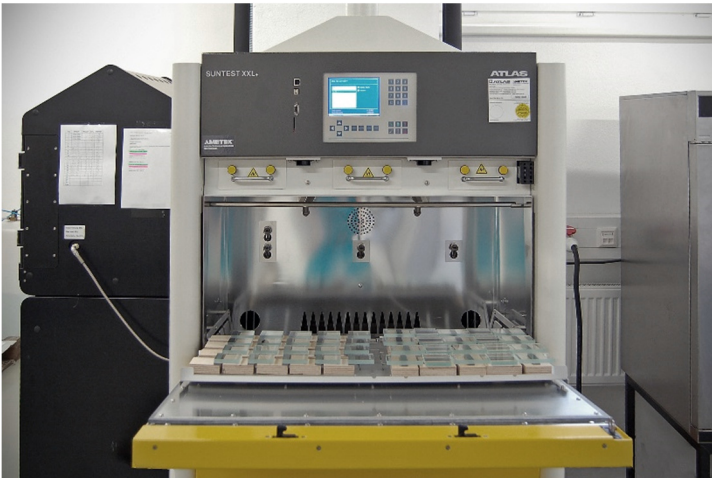


Bild 85

Prüfgerät mit Xenonlampen zur künstlichen UV-Bewitterung (Atlas Suntest XXL) mit geöffnetem Probenraum. Sensoren überwachen beim Versuch kontinuierlich die Bestrahlungsstärke und die Probenraumtemperatur. Bei Abweichungen von den Versuchsparametern regelt das System selbsttätig nach.

Der Bewitterungsversuch verläuft gestaffelt. Nach 500 Stunden wird der Test kurzfristig unterbrochen, ein Teil der Prüfkörper entnommen und neue hinzugefügt. Die Bestrahlung wird danach fortgesetzt. Zwischen Entnahme und mechanischer Prüfung liegt eine Ruhephase von 24 ± 4 Stunden, in der die Prüfkörper unter Laborbedingungen lagern und visuell begutachtet werden. Insgesamt 40 Scher- und 40 Zugproben werden mit dieser Methode gealtert. Jedes Prüflos besteht aus fünf Prüfkörpern mit identischer Geometrie und Materialkombination.

6.3.3 Lagerung in Reinigungsmittellösung

Anhand dieses Versuchs lässt sich der Einfluss von Reinigungsmitteln auf die Festigkeit der Klebschicht beurteilen. Die Prüfkörper werden 21 Tage bei einer Temperatur von $+45\text{ °C}$ in einprozentiger Reinigungsmittellösung²³⁶ gelagert, wobei sie dabei vollständig ins Wasser eintauchen müssen (Bild 86). Nach der Entnahme erfolgt die Rücktrocknung bei Standardlaborbedingungen ($+23\text{ °C}$ und 50 % rF). Speziell für Holzsubstrate wurde der entsprechende Versuch aus der ETAG 002 modifiziert.²³⁷ Nach der Trocknungsphase folgen die Haftversuche unter Zug- und Scherbeanspruchung. Jedes Prüflos besteht aus zehn Prüfkörpern.

²³⁶ Reinigungsmittel: Pril Original (Henkel AG), pH-Wert 5,2 – 5,8. (Vergleiche Henkel 2003.)

²³⁷ Nach ift-Richtlinie VE-08/2 Tab. 1 (Prüfung 4) wird der Versuch in Anlehnung an ETAG 002-1, 5.1.4.2.4 durchgeführt. Die Rücktrocknungsphase für Holz ist mit 7 Tagen deutlich länger als für Aluminium.

Bild 86

Reinigungsmittelbad. Abgebildet sind Scherprüfkörper aus Kiefernholz und Scotch-Weld DP 490. Die Behälter werden bei einer konstanten Temperatur von +45 °C im Wärmeschrank (Memmert Typ UFP 700) gelagert. Die Prüfkörper werden von der Reinigungsmittellösung vollständig bedeckt.

**6.3.4 Holzfeuchtewechsel bei +20 °C**

Die Auswirkung von hohen beziehungsweise niedrigen Holzfeuchten auf das Haftverhalten wird durch die Lagerung der Proben bei entsprechenden Klimaten in einer Klimakammer (Feutron Typ KPK 600) untersucht.²³⁸ Das Verfahren gliedert sich in zwei voneinander unabhängige Teile. Eine Hälfte der Proben wird bei einer Temperatur von +20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 90 % gelagert. Die andere Hälfte wird bei der gleichen Temperatur und einer Luftfeuchte kleiner als 30 % getrocknet. Sobald die korrespondierende Ausgleichsfeuchte erreicht wird, können die Prüfkörper getestet werden. Die Haftfestigkeitsversuche erfolgen ohne Zeitverzögerung, da sich der Feuchtegehalt nicht mehr verändern darf. Insgesamt werden 20 Zug- und 20 Scherprüfkörper befeuchtet und die gleiche Menge getrocknet. Das sind jeweils fünf pro Materialkombination und Lagerbedingung.

Mehrere Referenzproben werden zusammen mit den geklebten Kleinteilprüfkörpern eingelagert, um die tatsächliche Holzfeuchte zu Beginn und am Ende der Klimalagerung zu bestimmen. Die Referenzproben und ausgewählte Kleinteilprüfkörper werden in regelmäßigem Abstand gewogen, um festzustellen, wann das Feuchtegleichgewicht erreicht ist. In beiden Fällen konnte nach etwa zweiwöchiger Klimalagerung geprüft werden. Bild 87 und Tafel 9 fassen die Ergebnisse der Kontrollmessungen zusammen.

²³⁸ Vergleiche ift-Richtlinie VE-08/2, Tab. 1 (Prüfung 5)D der Test gilt speziell für Holzsubstrate.

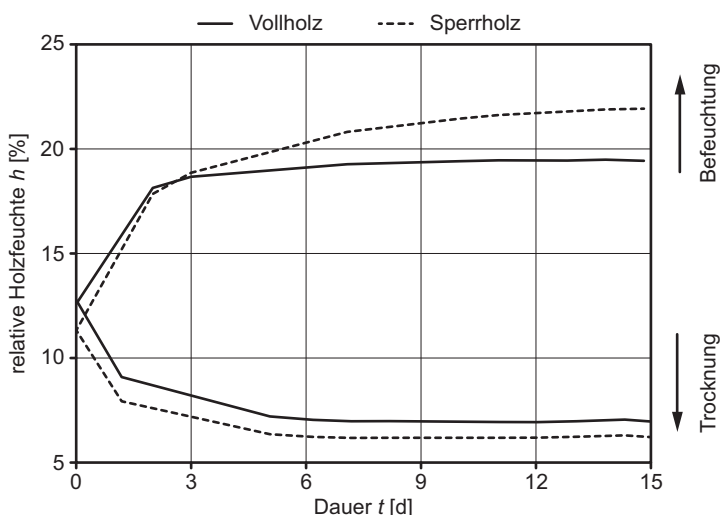


Bild 87

Feuchteänderung für repräsentative Referenzproben. Die Ausgangsfeuchte von Sperrholz unterscheidet sich leicht von der von Vollholz. Die Werte entsprechen gängigen Literaturangaben.²³⁹ Nach Beginn des Versuchs nimmt das Holz sehr schnell Wasser aus der Luft auf beziehungsweise gibt es bei der Trocknung an diese ab. Erst nach einigen Tagen nähern sich die Werte an die Ausgleichsfeuchte an. Nach etwa 14 Tagen ist das Gleichgewicht bei allen Referenzproben erreicht.

Substrat	Ausgangsklima 20 °C 65 % rF	Befeuchtung 20 °C 90 % rF	Trocknung 20 °C < 30 % rF
Zielwert nach VE-08/2	13 ± 2 %	≈ 18 %	≈ 6 %
Sperrholz aus Birke	11,3 %	22,5 %	6,2 %
Massivholz aus Kiefer	12,7 %	19,8 %	7,0 %

Tafel 9

Feuchtegehalt der Referenzproben vor Versuchsbeginn und nach Klimalagerung. Die Werte (Mittelwerte aus drei Messungen) wurden im Darrtrockenverfahren nach DIN EN 13183-1 bestimmt. Geringe Abweichungen zu den Zielwerten der ift-Richtlinie VE-08/2 sind den spezifischen Holzeigenschaften geschuldet.

6.3.5 Lagerung in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre

Die Prüfkörper werden in einem speziellen Kondenswasserprüfschrank über 20 Zyklen einer feuchten, Schwefeldioxid (SO₂) enthaltenden Umgebung ausgesetzt (Bild 88).²⁴⁰ Ein Zyklus dauert 24 Stunden. Nach Einleiten des Schwefeldioxids wird der Prüfraum auf eine Temperatur von +40 °C aufgeheizt. Gas und Kondenswasser reagieren miteinander und bilden eine saure und somit korrosive Atmosphäre. Die Bedingungen werden für 8 Stunden aufrechterhalten. Danach wird der Prüfraum entlüftet. Es folgen 16 Stunden unter Standardlaborklima (+23 °C und 50 % rF), bevor der Zyklus erneut gestartet wird. Der Versuch endet nach einem zwanzigmaligen Durchlaufen des beschriebenen Prüfzyklus.²⁴¹

²³⁹ Vergleiche Tafel 4.

²⁴⁰ Vergleiche ETAG 002-1, 5.1.4.2.4 und ift-Richtlinie VE-08/2, Tab. 1.

²⁴¹ Der Prüfablauf wird an den Wochenenden unterbrochen, da das Schwefeldioxid nur manuell in die Kammer eingeleitet werden kann.

Bild 88

Korrosionsprüfschrank zur SO_2 -Bewitterung (VLM Typ CON 300-FL AIR CWC) mit eingelagerten Zug- und Scherprüfkörpern. Die Prüfkammer hat ein Volumen von etwa 300 l. Die Probenzone befindet sich oberhalb einer mit demineralisiertem Wasser gefüllten Bodenwanne, über der das Schwefeldioxid ($0,2 \text{ l}$) eingeleitet wird. Das Wasser wird vor jedem Aufheizvorgang abgelassen und erneuert. Die Prüfbedingungen entsprechen DIN EN ISO 3221.



In der Zeit zwischen den Heizphasen kann die Tür zum Probenraum für eine visuelle Begutachtung der Proben geöffnet werden. Regelmäßig wird überprüft, ob sich die Beschaffenheit der Prüfkörper verändert hat. Nach Ende der künstlichen Bewitterung werden die Proben entnommen und mit klarem Wasser abgespült. Anschließend lagern die Proben für weitere 24 ± 4 Stunden unter Laborbedingungen. Die Zug- und Scherprüfungen erfolgen unmittelbar im Anschluss daran. Zehn Zug- und zehn Scherprüfkörper werden von jeder Materialkombination untersucht.

6.3.6 Kriechversuche

Zur Analyse des zeitabhängigen Materialverhaltens der Klebschichten unter statischer Langzeitbeanspruchung werden Kriechversuche an den in Bild 79 gezeigten Zugscherprüfkörpern durchgeführt. Für die Versuche steht eine Zeitstandanlage mit zehn parallelen Messstellen, die individuell belastet werden können, zur Verfügung (Bild 89). Die Messstellen sind entkoppelt, sodass bei Bruch eines einzelnen Prüfkörpers der Stoßimpuls die Ergebnisse benachbarter Proben nicht beeinflusst. Pneumatische und durch die Messsoftware steuerbare Hubvorrichtungen erlauben es, die Belastung stoßfrei und zeitversetzt aufzubringen. Die Kraft kann nahezu stufenlos in einem Bereich von etwa 0 bis 1.500 N voreingestellt werden. In Abhängigkeit vom Lastniveau wird die statische Dauerlast entweder direkt durch Einzelgewichte oder verstärkt über ein Hebelsystem aufgebracht. Zugstangen übertragen die Kräfte auf die Prüfkörper in der Probenkammer. Sämtliche Kriechprüfungen erfolgen

bei einer Temperatur von +23 °C, die durch ein angeschlossenes Temperiergerät konstant gehalten wird. Tafel 10 fasst das Untersuchungsprogramm zusammen. Die Lastniveaus werden analog zu den Kriechversuchen an bauteilähnlichen Prüfkörpern festgelegt, um die Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Prüfkörperdimensionen vergleichen zu können (Abschnitt 7.1.5 und 7.3.3).

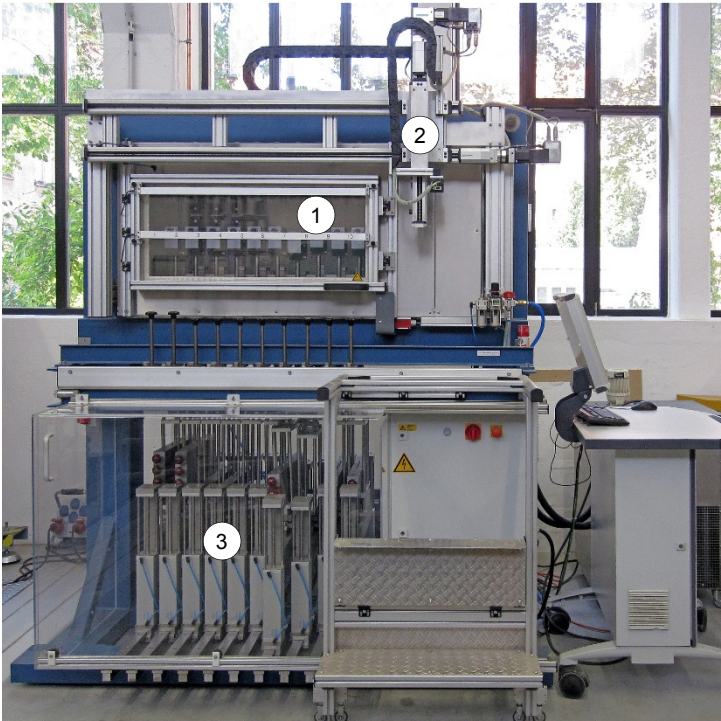


Bild 89
Mechanische Zeitstand-
prüfanlage (Coesfeld Materi-
altest) mit zehn Messstellen.

1 Probenkammer mit Tem-
perierung
2 Kamerasystem zum auto-
matischen Erfassen der
Prüfkörperverformungen
3 Gewichtskörbe und pneu-
matische Belastungsfrei-
gabe

Lastniveau ^a	Ottocoll® S660	nolax C44.8505	Scotch-Weld™ DP 490 ^a
1 ($\tau \approx 5 \% R_{u,5}$)	2 PK 0,05 N/mm ² (30 N – direkt)	–	–
2 ($\tau \approx 10 \% R_{u,5}$)	4 PK 0,10 N/mm ² (60 N – direkt)	2 PK 0,20 N/mm ² (120 N – direkt)	–
3 ($\tau \approx 35 \% R_{u,5}$)	2 PK 0,30 N/mm ² (180 – Hebel)	2 PK 0,70 N/mm ² (420 N – Hebel)	–
4 ($\tau \approx 55 \% R_{u,5}$)	–	4 PK 1,20 N/mm ² (720 N – Hebel)	2 PK 1,20 N/mm ² (720 N – Hebel)
5 ($\tau \approx 70 \% R_{u,5}$)	–	2 PK 1,50 N/mm ² (900 N – Hebel)	–

Tafel 10
Belastung der Prüfkörper in
den Kriechversuchen. Ne-
ben der Schubspannung
sind die Prüfkörperanzahl
(PK) und die eingesetzte
Belastungsvorrichtung
(Hebel- / Direktbelastung)
für jedes untersuchte Lastni-
veau angegeben.

^a Das Lastniveau wird anal-
og zu Tafel 14 festgelegt.
Die Prozentangaben be-
ziehen sich auf die cha-
rakteristische Festigkeiten
 $R_{u,5}$, die im Rahmen der
Kurzzeitversuche an bau-
teilähnlichen Prüfkörpern
ermittelt wurden.

Unter Annahme einer gleichmäßig verteilten Spannung in der Klebfläche wirken in den kleinen Zugscherprüfkörpern die gleichen Spannungen wie in den großen Scherprüfkörpern, die in den Bauteilversuchen unter statischer Langzeitbeanspruchung untersucht werden (Abschnitt 7.3.3). An Prüfkörpern mit Klebschichten aus Scotch-Weld DP 490 wird allerdings nur ein Lastniveau untersucht, da weitere Versuche aufgrund der Messergebnisse als nicht zielführend erachtet wurden (Abschnitt 6.4.6). Die Versuchsdauer beträgt 1000 Stunden. Eine verfahrbare Kamera erfasst anhand aufgeklebter Messmarken die gegenseitige Verschiebung der beiden Fügeile. Daraus lässt sich die Schubverzerrung der Klebschicht ableiten. Am Anfang erfolgen die Messungen in sehr kurzen Abständen, da die Verformungen kurz nach der Belastung schneller anwachsen. Mit zunehmender Dauer vergrößert sich dann das Messintervall. Am Ende werden die Prüfkörper wieder entlastet. Nach einer Rückverformungsphase von mindestens sieben Tagen erfolgt die Kurzzeitprüfung der mechanisch gealterten Prüfkörper. Die Rückverformung wird jedoch nicht durch das Kamerasystem aufgezeichnet.

6.4 Auswertung der Versuchsergebnisse

6.4.1 Anfangsfestigkeit im Scherversuch

Die Anfangsfestigkeit der Klebschichten wurde bei drei unterschiedlichen Temperaturstufen bestimmt. Die höherfesten Klebstoffe zeigen im Scherversuch qualitativ die gleiche Abhängigkeit von der Temperatur wie in der Vorversuchsserie (Abschnitt 5.5.4). Beim silanmodifizierten Epoxidharzklebstoff nolax C44.8505 nimmt die mittlere Bruchfestigkeit mit Absinken der Prüftemperatur kontinuierlich zu. Der Maximalwert resultiert aus den Versuchen bei -20 °C. Bei Scotch-Weld DP 490 werden die höchsten Werte hingegen bei Raumtemperatur erreicht. An der unteren und an der oberen Grenze des Temperatureinsatzbereichs liegt die Bruchfestigkeit zum Teil deutlich darunter. Die Bruchspannungen aus den Scherversuchen sind in Bild 90 zusammengefasst.

Im Vergleich zu den Vorversuchen ergeben sich jedoch fast durchgängig geringere Bruchwerte. Die Festigkeitsabnahme wird offenbar durch die überarbeitete Klebfugegeometrie verursacht, da die Festigkeit von geklebten Verbindungen im

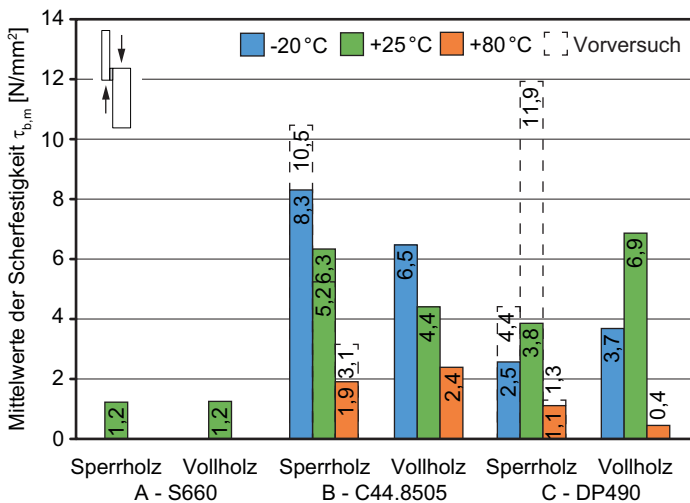


Bild 90

Anfangsfestigkeit der Klebschichten aus Scherversuchen. Das Diagramm zeigt die gemittelten Werte bei unterschiedlichen Prüftemperaturen. Die zugehörigen Bruchfestigkeiten aus den Vorversuchen an Scherprüfkörpern (Bild 74) sind zum Vergleich gestrichelt dargestellt.

Allgemeines mit zunehmender Dicke sinkt.²⁴² In den Hauptversuchsserien wurde die Klebschichtdicke einheitlich von 1 mm auf 3 mm gegenüber den Vorversuchen erhöht. Bei Scotch-Weld DP 490, der bei Raumtemperatur eine ungewöhnlich hohe Differenz zu den Scherfestigkeitswerten aus den Vorversuchen offenbart, kommt aber noch eine weitere Einflussgröße hinzu. Die Vielzahl an Substratbrüchen im Glas (Bild 91, rechts) bei -20 °C und bei +25 °C ist die unmittelbare Folge der geänderten Glasart. Bei den Vorversuchen war nahezu kein Glasbruch zu beobachten. Aufgrund der geringeren Biegezugfestigkeit von Floatglas, das zugunsten einer exakteren Klebfugengeometrie für die Prüfkörper der Hauptversuche verwendet wurde, brechen die Prüfkörper nun schon bei wesentlich geringeren Scherkräften. Der typische Bruch quer zur Belastungsrichtung im eigentlich unbelasteten Fügeabschnitt deutet auf eine unplanmäßige Biegebeanspruchung der Scherprüfkörper hin. Eine Aussage zur tatsächlichen Festigkeit der Klebschicht ist in diesem Fall nicht möglich. Das Versagensbild weist darüber hinaus auf Spannungsspitzen hin, die diese sehr steife Verbindung aus dem Epoxidharzklebstoff möglicherweise hervorruft. Die Prüfkörper mit dem nachgiebigeren Klebstoff nolas C44.8505 erreichen bei sonst gleichen Bedingungen und Substratkombinationen deutlich höhere Bruchwerte.

²⁴² Die Querkontraktionsbehinderung des Klebstoffs durch die Fügeile wirkt sich positiv auf die Festigkeit der Klebung aus. Mit zunehmender Klebschichtdicke nimmt der Einfluss dieses Effekts ab. (Vergleiche Habenicht 2006, S. 442 f. und S. 457 f.)

Glasbruch tritt hier nur in geringem Umfang auf. Die offenkundig homogenere Spannungsverteilung führt somit zu einer besseren Auslastung der Klebschicht.

Ein klebstoffübergreifender Zusammenhang zwischen der Art des Holzsubstrats und der Bruchfestigkeit kann nicht erkannt werden, da sich ein nur uneinheitliches Bild in den Versuchsergebnissen abzeichnet. Für nolax C44.8505 ergeben sich bei Temperaturen von -20 °C und +25 °C geringere Scherfestigkeiten auf Vollholz als auf Furniersperrholz. Das Verhältnis der Bruchfestigkeiten korreliert hier annähernd mit den entsprechenden Materialkennwerten der Substrate.²⁴³ Da bei den zugehörigen Bruchmustern jedoch adhäsives Versagen (Bild 91, Mitte) auf der Holzoberfläche überwiegt, bleibt offen, ob tatsächlich ein kausaler Zusammenhang besteht. Im Fall des steiferen Klebstoffs Scotch-Weld DP 490 ist dieses Verhältnis genau entgegengesetzt. Hier werden tendenziell höhere Werte auf Vollholz erreicht.

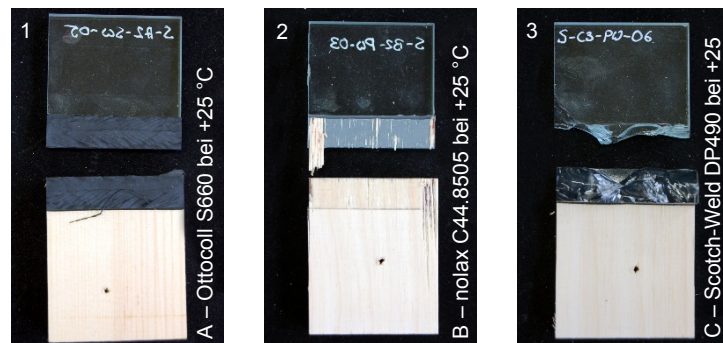
Die Ergebnisse für die Prüfkörper mit Silikonklebung, die hier ausschließlich bei Raumtemperatur untersucht werden, zeigen dagegen gar keine Abhängigkeit von der Holzart, da die Klebungen kohäsiv versagen (Bild 91, links). Die mittlere Bruchfestigkeit der Klebschichten aus Ottocoll S660 liegt für beide Holzsubstrate auf einem einheitlichen Niveau von etwa 1,2 N/mm² und damit deutlich unter den Werten der härtesten Klebstoffe.

Bild 91

Typische Bruchbilder aus den Scherversuchen.

- 1 kohäsiver Bruch (100 %)
- 2 adhäsiver Bruch auf der Sperrholzoberfläche mit teilweise Substratbruch Holz (90 % bzw. 10 %)
- 3 Substratbruch Glas (100 %)

(Flächenanteile an gezeigten Proben in Prozent)



²⁴³ Das Verhältnis der mittleren Schubfestigkeiten von Birkenholz und Kiefernholz beträgt $12/10 = 1,20$ (DIN 68364, Tab. 1 und 2). Bei Betrachtung der Elastizitätsmoduln in Faserrichtung ergibt sich ein Verhältnis von $10.050/13.000 = 1,24$ (Tafel 4).

Bild 92 fasst die Flächenanteile der erfassten Versagensmuster für alle Scherversuche vor der Alterung zusammen. Die grundlegende Verteilung deckt sich mit den Beobachtungen aus den Vorversuchen (Bild 75). Lediglich der stark erhöhte Glasbruchanteil bei Scotch-Weld DP 490 weicht davon ab. Ein Einfluss der Holzart auf das Bruchbild kann nicht festgestellt werden, da sich unter gleichen Prüfbedingungen sowohl auf der Vollholz- als auch auf der Sperrholzoberfläche ähnliche Bruchmuster ausbilden.

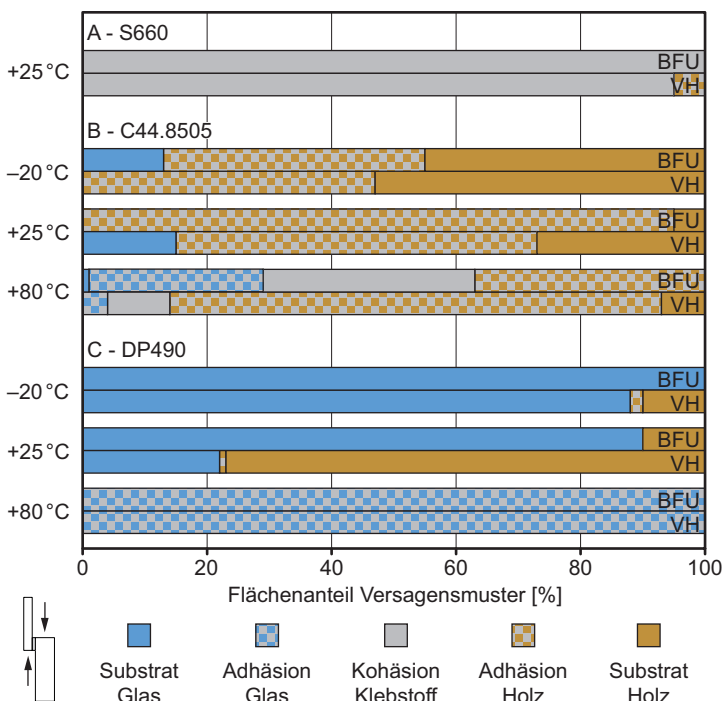


Bild 92

Bruchverhalten der Scherprüfkörper. Die Versuche zum Bestimmen der Anfangsfestigkeit wurden bei drei Temperaturstufen (-20 °C, +25 °C, +80 °C) durchgeführt. Die Flächenanteile der Versagensmuster werden getrennt nach den beiden Substratkombinationen dargestellt.

BFU: Furniersperrholz Birke
VH: Vollholz Kiefer

Die Prüfkörper mit Ottocoll S660 versagen nahezu vollständig kohäsiv. Bei nolax C44.8505 überwiegen dagegen adhäsive Brüche auf der Holzseite. Die Versagensmuster von Scotch-Weld DP 490 sind durch einen hohen Glasbruchanteil gekennzeichnet. Bei hohen Temperaturen tritt dann jedoch adhäsives Versagen an der Glasoberfläche auf.

Die Klebungen mit nolax C44.8505 versagen in der Mehrzahl adhäsiv auf der Holzseite, wobei partiell Fasern und kleinere Stücke aus der Oberfläche ausreißen (Bild 91, Mitte). Das Bruchbild ändert sich über die Temperaturvariation nur unwesentlich. Bei tiefer Temperatur nimmt der Anteil an Holzbruch leicht zu. An der oberen Temperaturgrenze tritt dagegen vereinzelt kohäsives Versagen in Kombination mit einem geringfügigen Haftverlust auf der Glasseite auf. Bei Scotch-Weld DP 490 führt jedoch eine Temperatur von +80 °C generell zu adhäsivem Versagen auf der Glasseite. Eine solch signifikante Veränderung des Bruchmusters unter Einfluss der Umgebungsbedingungen wird als kritisch eingestuft, da offensichtlich die Haftung auf der Glasoberfläche

durch die Temperaturbeanspruchung grundlegend beeinträchtigt wird.

Die Temperatur beeinflusst auch das Verformungsverhalten der Klebverbindungen. Das zeigen bereits die Versuche an reinen Materialproben (Abschnitte 5.5.1 und 5.5.2). Bei Erwärmung nimmt die Steifigkeit der Klebschichten aus nolax C44.8505 kontinuierlich über den Anwendungstemperaturbereich ab (Bild 93). Scotch-Weld DP 490 erweicht dagegen erst oberhalb des Glasübergangs (Bild 94). Die Bruchfestigkeit und die Steifigkeit der zwei höherfesten Klebstoffe liegen dennoch über den Vergleichswerten des nur bei Raumtemperatur getesteten Silikonklebstoffs Ottocoll S660.

In den Schubversuchen bei Raumtemperatur und bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt nolax C44.8505 ein ausgeprägt nichtlineares Materialverhalten. Der Kurven lassen sich in zwei Bereiche teilen, in denen der Graph näherungsweise linear verläuft. Zu Versuchsbeginn spricht der Klebstoff relativ steif an. Bei Überschreiten einer bestimmten Dehngrenze fällt die Steifigkeit dann aber erkennbar ab. Die Schubspannungs-Gleitungs-Kurve verläuft ab diesem Punkt flacher und es treten irreversible Fließverformungen in der Klebschicht auf. Aufgrund der Prüfmethode, die eine kontinuierliche Steigerung der Belastung bis zum Bruch vorsieht, kann dieser viskose Anteil der Verformung jedoch nicht näher quantifiziert werden. Das duktile Materialverhalten, das der silanterminierte Klebstoff auch bei niedrigen Temperaturen aufweist, ist ein Vorteil für dessen Einsatz in tragenden Glaskonstruktionen und in Verbundbauteilen.

Der steifere Klebstoff Scotch-Weld DP 490 verhält sich dagegen sehr spröde. Eine Streckgrenze, wie sich aufgrund der zähelastischen Modifikation des Klebstoffpolymers in den einaxialen Zugversuchen (Bild 73) zeigte, bildet sich bei den Scherversuchen nicht aus. Die Bruchdehnungen sind sehr gering. Die große Streuung resultiert jedoch aus einigen fehlerbehafteten Messungen der Klebschichtverformung. Aufgrund der hohen Steifigkeit werden die ohnehin nur geringen Verformungen durch andere Effekte, wie beispielsweise durch eine geringfügige Verdrehung der Prüfkörper in der Versuchsvorrichtung, überlagert.

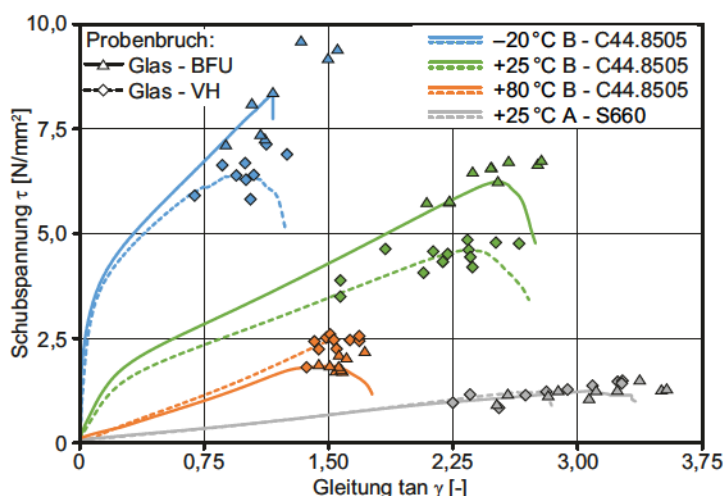


Bild 93
Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung (repräsentative Messkurven) aus Scherverversuchen an nolax C44.8505 und Ottocoll S660. Die individuellen Bruchwerte sind markiert.

BFU: Furniersperrholz
VH: Vollholz Kiefer

Die Graphen der Einzelmessung sind in Anhang B zusammengestellt.

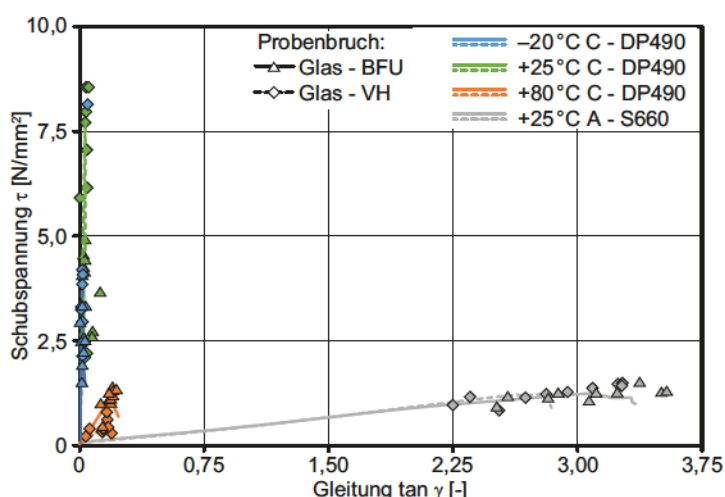


Bild 94
Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung (repräsentative Messkurven) aus Scherverversuchen an Scotch-Weld DP 490 und Ottocoll S660. Die individuellen Bruchwerte sind markiert.

BFU: Furniersperrholz Birke
VH: Vollholz Kiefer

Die Graphen der Einzelmessung sind in Anhang B zusammengestellt.

Die Holzart beeinflusst das Verformungsverhalten nur marginal. Die Messkurven aus beiden Materialkombinationen zeigen einen qualitativ ähnlichen Verlauf. Häufig liegen die Schubspannungswerte der Prüfkörper auf Basis von Vollholz leicht unter denen, die mit Sperrholz verklebt wurden. Die erreichten Bruchgleitungen unterscheiden sich kaum.

6.4.2 Anfangsfestigkeit im Zugversuch

In den Zugversuchen stellen sich relativ einheitliche Ergebnisse ein (Bild 95). Die Zugfestigkeit der Klebschichten aus Silikon erreicht mit $1,2 \text{ N/mm}^2$ ähnliche Werte wie im Scherverversuch. Die beiden steiferen Klebstoffe nolax C44.8505 und Scotch-Weld DP 490 versagen bei Raumtemperatur im Mit-

tel zwischen 2,8 und 4,1 N/mm². Das sind geringere Festigkeiten als im Scherversuch. Auch bei einer tieferen Prüftemperatur von -20 °C steigen die Werte nicht weiter an. Anhand der Bruchmuster lässt sich die geringe Festigkeit der Holzsubstrate bei Beanspruchung quer zur Faserrichtung als Ursache identifizieren. Die Prüfkörper versagen überwiegend durch Holzbruch (Bild 96), wobei die erzielten Bruchwerte in sehr grober Näherung mit der Zugfestigkeit von Kiefernholz übereinstimmen.²⁴⁴

Bild 95

Anfangsfestigkeit der Klebschichten aus Zugversuchen. Das Diagramm zeigt die gemittelten Werte bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.

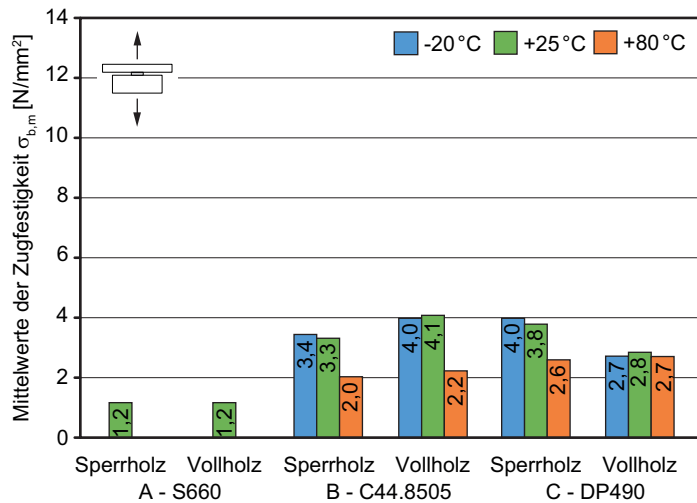
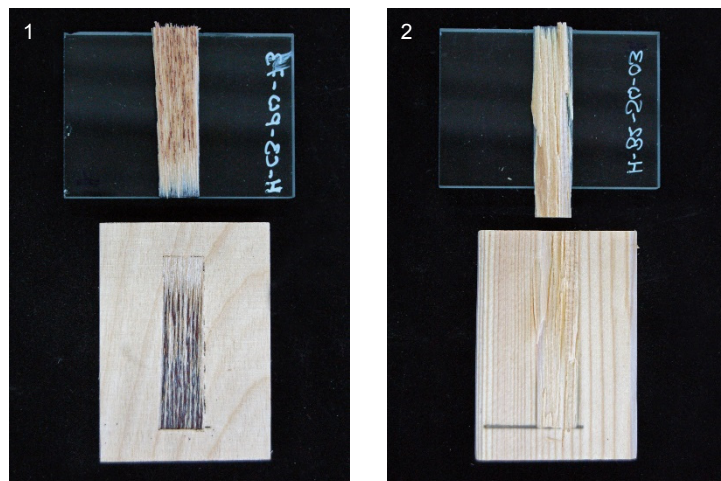


Bild 96

Holzbruch beim Zugversuch.

- 1 Furniersperrholz Birke
- 2 Vollholz Kiefer



²⁴⁴ Die mittlere Zugfestigkeit senkrecht zur Faser beträgt bei Kiefernholz ca. 3,0 N/mm². (Vergleiche Niemz 1993, S. 159.) Für Furniersperrholz lagen keine Angaben zur Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene vor.

Bei hoher Temperatur nimmt der Einfluss der Holzfestigkeit wiederum ab. Bei nolax C44.8505 treten neben Holzversagen vereinzelt kohäsive Brüche in der Klebung und adhäsive Brüche auf der Holzseite auf. Scotch-Weld DP 490 offenbart, wie schon bei den Scherversuchen, ein vermindertes Haftvermögen auf der Glasseite. Da diese Beobachtungen mit den Scherversuchen übereinstimmen und der überwiegende Teil der Zugprüfkörper durch Holzbruch versagt, wird hier auf eine Darstellung einer Gesamtübersicht zu den im Zugversuch erfassten Bruchbildern verzichtet.²⁴⁵

Das Verformungsverhalten der Klebschichten lässt sich mit der verwendeten Versuchs- und Messkonfiguration nicht eindeutig auswerten, da der aufgezeichnete Traversenweg insbesondere bei steifen Klebschichten nur eine geringe Aussagekraft hat. Die Längenänderung in der Haltevorrichtung und dem Anschlussgestänge verfälschen die Messergebnisse und erlauben keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Verformung der Klebschicht.²⁴⁶ Die Bruchspannungswerte genügen aber schon für eine Bewertung des Alterungsverhaltens. Vom Vergleich der Kraft-Verformungs-Beziehungen aus den Zugversuchen wird daher abgesehen. Anhang B enthält eine ausführliche Darstellung der Messergebnisse.

6.4.3 Sichtbare Veränderungen der Klebschicht

Sichtbare Klebschichtbereiche wurden nach der Entnahme der Prüfkörper aus den Prüfkammern begutachtet. Nach bestimmten Alterungsszenarien zeigten einige Klebschichten optische Veränderungen, die auf eine mögliche Beeinträchtigung des Haft- und Verformungsverhaltens hindeuten.

Der silanmodifizierte Epoxidharzklebstoff nolax C44.8505 verfärbt sich nach längerer UV-Bestrahlung im mittleren Teil der durch das Glas sichtbaren Klebfläche gelblich bis bräunlich (Bild 97). Die Verfärbung hat nach 500 Stunden bereits begonnen, war aber noch nicht sehr intensiv. Deutlicher

²⁴⁵ Die Flächenanteile der begutachteten Bruchmuster aus den Zugversuchen sind zusammen mit den Einzelergebnissen der Scher- und Zugversuche in Anhang B in Bild B.154 dargestellt.

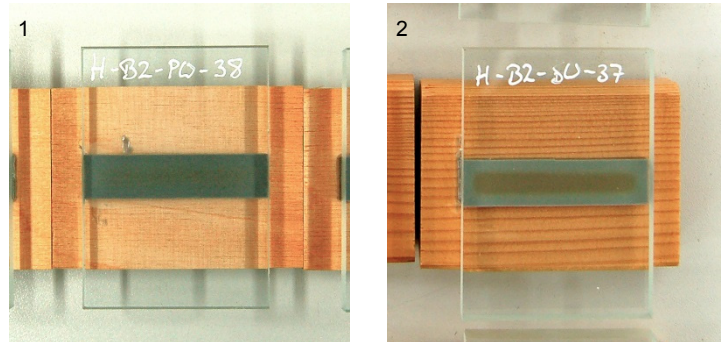
²⁴⁶ Die Längenänderung kann beispielsweise durch eine Referenzmessung ermittelt werden, bei der nur das Gestänge und die Prüfkörperaufnahme belastet wird. Mithilfe der Referenzmessung lässt sich dann die tatsächliche Prüfkörperverformung berechnen.

sichtbar ist die Degradation hingegen nach 1000 Stunden Bestrahlungsdauer. Aufgrund dieser optischen Veränderung, wird ein starker Einfluss der UV-Bestrahlung auf das Klebschichtverhalten erwartet. Der andere Klebstoff Scotch-Weld DP 490 offenbart dagegen keine optischen Veränderungen nach der Bestrahlung. Bei allen Prüfkörpern dieser Serie dunkelte das Holz nach, was dem natürlichen Alterungsprozess von hellen Holzarten unter Sonneneinstrahlung entspricht.

Bild 97

Optische Veränderung der Klebschicht nach UV-Lagerung (nolax C44.8505).

- 1 einsetzende Braunfärbung im mittleren Fugenbereich nach 500 Stunden Bestrahlungsdauer
- 2 ausgeprägte Braunfärbung im mittleren Fugenbereich nach 1000 Stunden Bestrahlungsdauer



Weitere Veränderungen lassen sich bei der Lagerung in Reinigungsmittellösung beobachten. Hier treten bei Scotch-Weld DP 490 mutmaßlich Haftverluste an den Ecken und Rändern der Klebschicht auf. Sichtbar wird das Ablösen durch hell schimmernde Bereiche in der ansonsten homogen schwarzen Klebfläche (Bild 98, links). An diesen Stellen ist die Haftung zwischen Klebstoff und Glasoberfläche augenscheinlich gestört. Eine solche Schädigung kann unter dem Einfluss des gleichen Schadmediums nolax C44.8505 nicht beobachtet werden. Allerdings verfärben sich hier die Klebschichttränder (Bild 98, rechts). Der Einfluss des möglicherweise eindringenden Wassers erstreckt sich auf einen Streifen von etwa 1 mm Breite. Das Innere der Klebfläche ist davon nicht betroffen.

Die genannten Schadauswirkungen traten durchgängig an allen Prüfkörpern der entsprechenden Prüfserien auf. Individuelle Unterschiede ließen sich lediglich in der Intensität der Verfärbung beziehungsweise in der Größe der betroffenen Fläche feststellen. Grundsätzlich zeigte sich keine Abhängigkeit von der Art des Holzsubstrats.

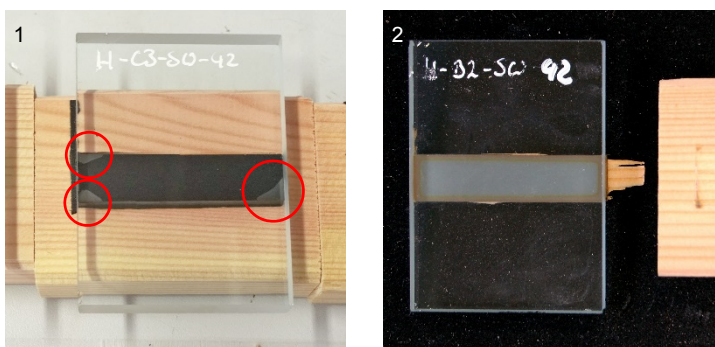


Bild 98

Optische Veränderung der Klebschicht nach 21-tägiger Lagerung in einem Bad aus Reinigungsmittellösung.

- 1 sichtbar beeinträchtigte Haftung im Eckbereich der Klebung nach Lagerung in Reinigungsmittellösung (Scotch-Weld DP 490)
- 2 Verfärbung im Randbereich der Klebung (nolax C44.8505)

Da bei den anderen Alterungsszenarien visuell keine Beeinträchtigungen der Klebschichten festgestellt werden konnte, stellen nach dieser ersten Begutachtung die UV-Bestrahlung und die Lagerung in Reinigungsmittellösung die kritischsten Umwelteinwirkungen dar.

6.4.4 Restfestigkeit nach Alterung

Einen weiteren Aufschluss über die Auswirkungen von Umweltbeanspruchungen auf das Verformungs- und Haftverhalten der Klebungen geben die Scher- und Zugversuche, die nach Ende der künstlichen Bewitterung durchgeführt werden. Die in den vorangegangenen Abschnitten 6.4.1 und 6.4.2 besprochenen Versuchsergebnisse zur Anfangsfestigkeit bei Raumtemperatur dienen als Referenz für den Vergleich mit der verbleibenden Festigkeit nach Alterung der Proben. Sämtliche Prüfkörper waren – abgesehen von den in Abschnitt 6.4.3 gezeigten optischen Veränderungen – nach Durchlaufen der unterschiedlichen Alterungsszenarien intakt und konnten getestet werden. Alle individuellen Messergebnisse aus den Scher- und den Zugversuchen sowie die entsprechenden Bruchmuster sind in Anhang B dargestellt.

Die Mittelwerte der Spannungen bei Bruch werden in Form von Netzdiagrammen (Bild 99) aufbereitet. Die Anfangsfestigkeit bei Raumtemperatur steht als Vergleichswert an der vertikalen Hauptachse. Um den Zusammenhang zwischen Feuchteinfluss und Bruchfestigkeit zu verdeutlichen, sind im linken Teil des Netzes alle Alterungsverfahren angeordnet, die offenkundig zu einer höheren Holzfeuchte als bei den Prüfungen vor der Alterung führen. Im rechten Teil befinden sich wiederum die Ergebnisse, nach Alterung unter vornehmlich trockenen Umgebungsbedingungen.

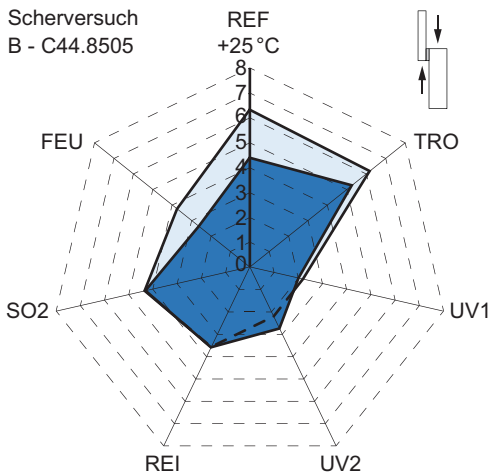
Die größte Festigkeitsminderung tritt bei den Prüfkörpern auf, die auch schon optisch auffällig waren. Grundsätzlich besteht somit ein Zusammenhang zwischen der visuellen Beobachtung und einer im statischen Kurzzeitversuch ermittelten Degradation der Klebverbindung. Nach der UV-Bestrahlung sinken die Festigkeiten der Klebschichten aus nolax C44.8505 deutlich. Die Scherfestigkeit fällt auf die Hälfte bis ein Drittel des ursprünglichen Werts. Scotch-Weld DP 490 zeigt dagegen in diesem Szenario keine messbare Degradation. Der sehr steife Epoxidharzklebstoff reagiert jedoch besonders empfindlich auf die Lagerung in der Reinigungsmittellösung, was die sichtbaren Haftungsmängel in der Grenzschicht zum Glas bereits vermuten ließen. Der Festigkeitsverlust beträgt hier bis zu 65 %. nolax C44.8505, dessen Klebschichtränder sich bei identischer Lagerung verfärbten und damit einen negativen Einfluss andeuten, verliert ebenso an Festigkeit. Die Differenz zum Ausgangswert ist allerdings weniger gravierend als bei Scotch-Weld DP 490.

Aber auch ohne optische Veränderung der Klebfuge offenbaren sich in den Kurzzeitversuchen Auswirkungen infolge der künstlichen Alterung. Bei Scotch-Weld DP 490 reduziert sich beispielsweise die Festigkeit auch nach der Lagerung in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre deutlich. Insgesamt reagiert der Epoxidharzklebstoff Scotch-Weld DP 490 damit empfindlich auf die Einwirkung von Schadmedien. Darüber hinaus lässt sich die Schädigung der Klebschicht durch Migration von Wasser²⁴⁷ an den Resultaten ablesen. Sämtliche Alterungsvorgänge, die mit erhöhtem Feuchteinfluss einhergehen, vermindern die Festigkeit der Prüfkörper im Vergleich zu den Ausgangswerten. Eine Ausnahme dazu bilden die Scherversuche mit Scotch-Weld DP 490, die allerdings wegen des hohen Glasbruchanteils nicht zweifelsfrei beurteilt werden können.²⁴⁸ Offen bleibt jedoch, inwieweit der Festigkeitsverlust auch auf eine verminderte Holzfestigkeit zurückgeführt werden kann, da die Holzeigenschaften generell eine starke Abhängigkeit von der Materialfeuchte zeigen.

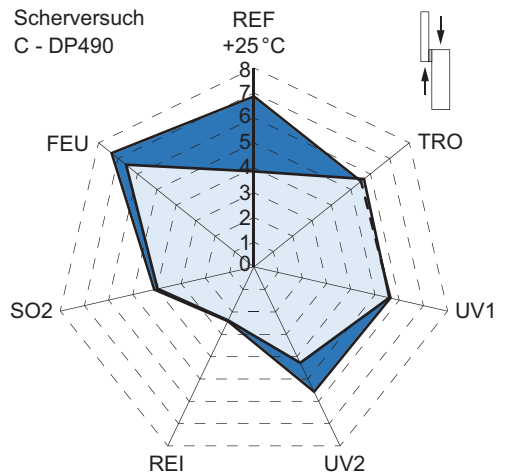
²⁴⁷ Vergleiche Habenicht 2006, S. 380 f.

²⁴⁸ Ein hoher Anteil an Glasbrüchen erlaubt kaum Aussagen zur tatsächlichen Klebschichtfestigkeit. Das eigentliche Haftvermögen beziehungsweise die innere Festigkeit des Klebstoffs liegt in einem Bereich oberhalb des Glasbruchniveaus. Eine mögliche Beeinträchtigung dieser Eigenschaften infolge Alterung kann somit nicht detektiert werden.

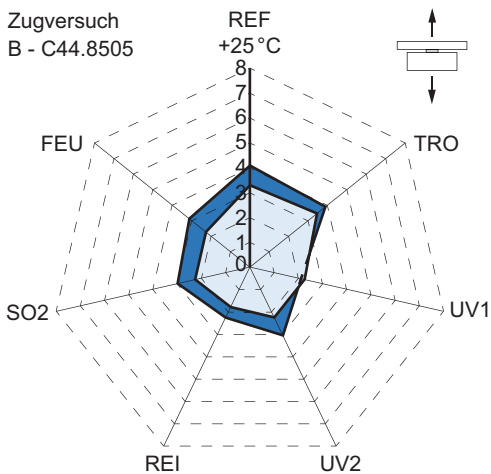
Scherversuch
B - C44.8505



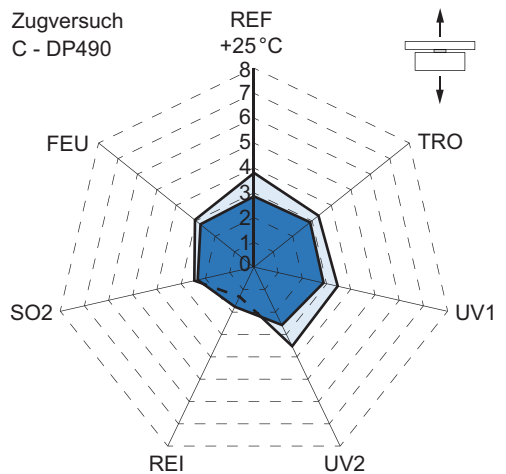
Scherversuch
C - DP490



Zugversuch
B - C44.8505



Zugversuch
C - DP490



REF Prüfung bei +25°C

UV1 Bestrahlung 500h

UV2 Bestrahlung 1000h

REI Reinigungsmittellagerung

FEU Befeuchtung bei +20°C | 90% rF

TRO Trocknung bei +20°C | <30% rF

SO2 Lagerung in SO₂-haltiger Atmosphäre

BFU

VH

Bild 99

Restfestigkeit im Vergleich zum Ausgangswert vor der Alterung (Mittelwerte).

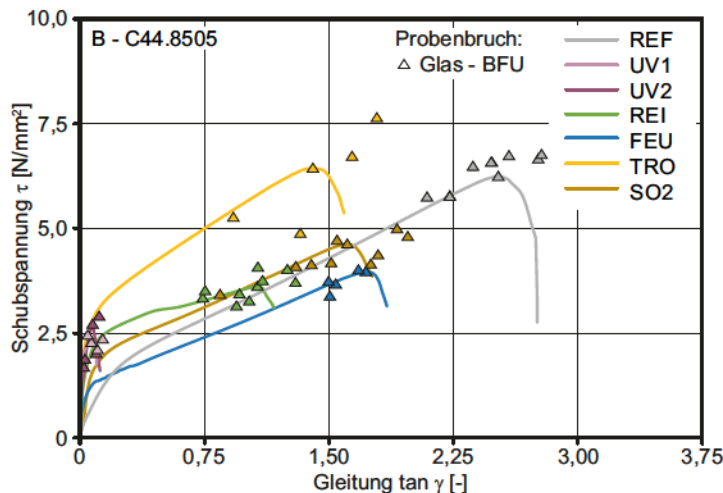
Welchen Einfluss die Holzart auf die Ergebnisse ausübt, kann nur durch eine parallele Analyse des Bruchverhaltens geklärt werden (Abschnitt 6.4.5). Insbesondere unter solchen Prüfbedingungen, die das Haftvermögen stark beeinträchtigen, gleichen sich die Bruchwerte zwischen den unterschiedlichen Holzarten aneinander an. Ansonsten bleiben Unterschiede zwischen Furniersperrholz und Vollholz, die sich schon im Ausgangszustand zeigten, auch nach der Alterung bestehen. Das gilt speziell für die Zugversuche.

Die künstlichen Umwelteinwirkungen beeinflussen zusätzlich auch das Verformungsvermögen des silanmodifizierten Klebstoffs nolax C44.8505. Die Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung (Bild 100) zeigt zwar auch noch nach der Alterung den typischen bilinearen Verlauf, die Kurven steigen aber im ersten Teil steiler an. Das Material ist somit etwas steifer. Gleichzeitig nimmt seine Verformungsfähigkeit ab, da die Bruchgleitungen nach der Alterung kleiner sind.

Bild 100

Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung der gealterten Prüfkörper (repräsentative Messkurven) aus Scherverversuchen an nolax C44.8505.

REF Prüfung bei +25 °C
 UV1 Bestrahlung 500 h
 UV2 Bestrahlung 1000 h
 REI Reinigungsmittel-lagerung
 FEU Befeuchtung bei +20 °C | 90 % rF
 TRO Trocknung bei +20 °C | < 30 % rF
 SO2 Lagerung in SO₂-haltiger Atmosphäre



Die Prüfkörper, die mit UV-Licht bestrahlt wurden, versagen besonders früh. Die Verfärbungen (Bild 97) und das oberflächennahe Klebfugenversagen auf der Glasseite (Bild 101) zeugen von der Schädigung des Klebstoffs. Ein duktileres Materialverhalten mit einem zweiten, flacher verlaufenden Kurventeil kann in diesem Fall nicht mehr erreicht werden.

Der Feuchteinfluss auf das Materialverhalten spiegelt sich ebenso in den Messkurven wieder. Schon bei geringen Spannungen treten bei den Proben, die in feuchtem Klima gelagert und direkt nach der Entnahme getestet wurden, plastische Verformungen auf. Bei denjenigen Proben, die getrocknet werden oder die nach Ende der Bewitterung noch eine gewisse Zeit im Labor lagern, knickt die Kurve erst bei höheren Spannungen ab. Hierfür kann ein Eindringen von Wasser in die Polymermatrix verantwortlich sein.²⁴⁹

²⁴⁹ Eindringende Feuchtigkeit kann in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Klebstoffs zu einer Plastifizierung und zur Erhöhung der Bruchzähigkeit führen. (Vergleiche Habenicht 2006, S. 376 und 384.)

6.4.5 Analyse der Versagensmuster

Das Bruchverhalten nach Alterung der Prüfkörper gibt weitere Auskunft über die Degradation der Klebschicht. Besonders auffällig sind die Klebfugen von nolax C44.8505 nach der Bestrahlung der Prüfkörper mit ultraviolettem Licht. Beim Bestimmen der Restfestigkeit treten überwiegend adhäsive Brüche beziehungsweise oberflächennahe Kohäsionsbrüche an der Grenzschicht zum Glas auf (Bild 101) – ein Zeichen für die fotochemische Veränderung der Klebschicht.

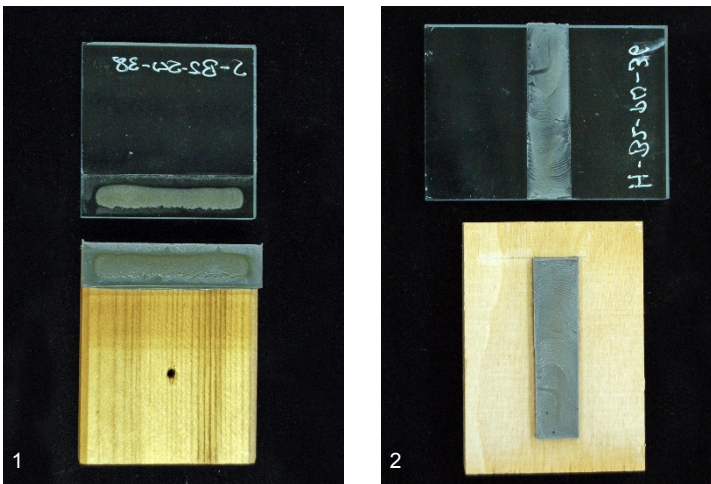


Bild 101

Typische Versagensmuster bei nolax C44.8505 nach der UV-Bestrahlung. Teilweiser Adhäsionsbruch in Kombination mit oberflächennahem Kohäsionsbruch.

1 Scherversuch
2 Zugversuch

Die anderen Alterungsszenarien wirken sich dagegen eher auf die Grenzschicht zum Holz aus. Infolge der porösen Werkstoffstruktur von Holz kann Feuchtigkeit in größerem Maße die Klebschicht angreifen, als es bei undurchlässigem Materialien möglich wäre. Die Scherprüfkörper versagen nach allen Verfahren mit Feuchteinwirkung ausschließlich adhäsiv (Bild 102). Faserausrisse lassen sich nur bei den Referenzversuchen an ungealterten Proben und nach Lagerung im Trockenklima beobachten. Das Versagensmuster im Zugversuch (Bild 103) ändert sich dagegen auch nach Alterung nicht. Bei der Mehrzahl der H-Prüfkörper bricht das Holzsubstrat. Die verminderte Zugfestigkeit, die gegenüber dem Referenzwert vor Alterung festgestellt wurde, korreliert mit der Abnahme der Holzfestigkeit unter Feuchteinfluss.²⁵⁰

²⁵⁰ Die Holzfestigkeit nimmt mit steigendem Feuchtegehalt des Holzes, insbesondere unterhalb des Fasersättigungspunkts, ab. (Vergleiche Niemz 1993, S. 74.)

Bild 102

Bruchverhalten von nolax C44.8505 in den Scherverversuchen nach Alterung.

Substrate:

BFU: Furniersperrholz Birke

VH: Vollholz Kiefer

Referenz, ungealtert:

REF: Prüfung bei +25 °C

Prüfung nach Alterung:

UV1: Bestrahlung 500 h

UV2: Bestrahlung 1000 h

REI: Reinigungsmittel-lagerung

FEU: Befeuchtung bei +20 °C | 90 % rF

TRO: Trocknung bei +20 °C | < 30 % rF

SO2: Lagerung in SO₂-haltiger Atmosphäre

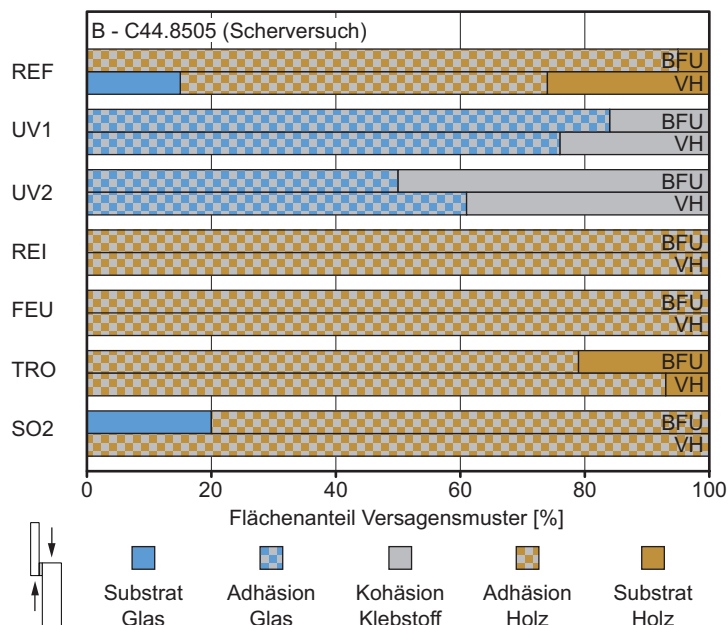
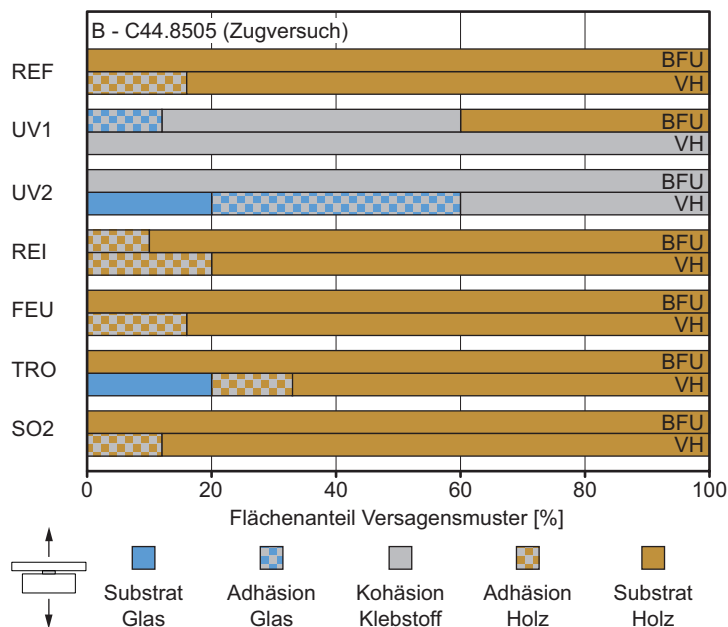


Bild 103

Bruchverhalten von nolax C44.8505 in den Zugversuchen nach Alterung.

Für die Kurzbezeichnungen der Alterungsszenarien und Materialien siehe Bild 102.



Der Epoxidharzklebstoff Scotch-Weld DP 490 offenbart nach einer Lagerung in Reinigungsmittellösung ein von den restlichen Versuchen abweichendes Bruchverhalten (Bild 104 und Bild 105). Nach dieser Alterung, aus der auch die geringste Restfestigkeit resultiert, versagt eine überwiegende Anzahl von Prüfkörpern durch Adhäsionsbruch auf der Glasoberfläche. Dieses Muster ist sowohl im Scherversuch als

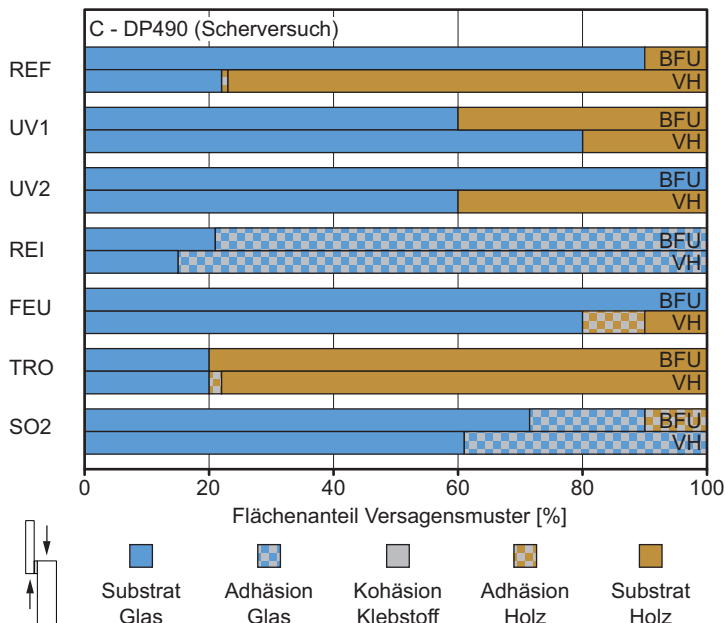


Bild 104

Bruchverhalten von Scotch-Weld DP 490 in den Scherversuchen nach Alterung.

Substrate:

BFU: Furniersperrholz Birke
VH: Vollholz Kiefer

Referenz, ungealtert:

REF: Prüfung bei +25 °C

Prüfung nach Alterung:

UV1: Bestrahlung 500 h

UV2: Bestrahlung 1000 h

REI: Reinigungsmittel-lagerung

FEU: Befeuchtung bei +20 °C | 90 % rF

TRO: Trocknung bei +20 °C | < 30 % rF

SO2: Lagerung in SO₂-haltiger Atmosphäre

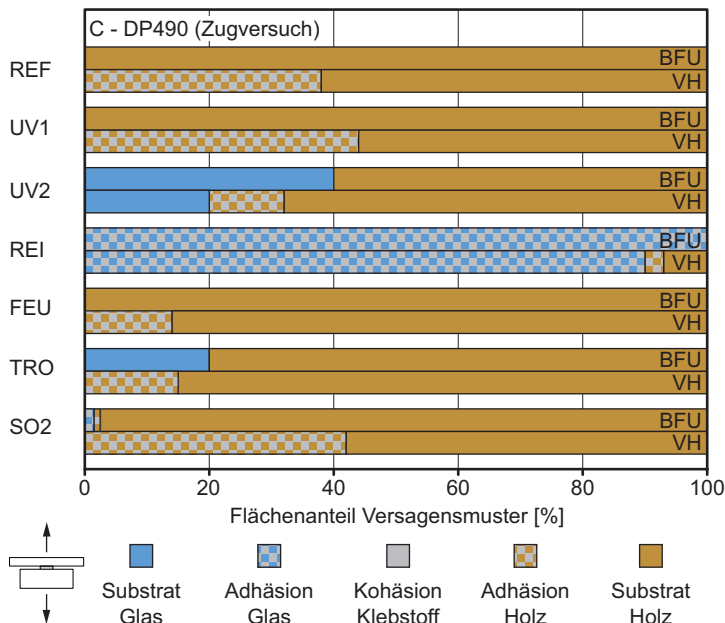


Bild 105

Bruchverhalten von Scotch-Weld DP490 in den Zugversuchen nach Alterung.

Für die Kurzbezeichnungen der Alterungsszenarien und Materialien siehe Bild 104.

auch im Zugversuch zu erkennen. Bereits bei der visuellen Beurteilung der Klebschicht kündigt sich diese Haftungsinsuffizienz durch sichtbare Ablöseerscheinungen an.

Die anderen Alterungsverfahren beeinflussen das Bruchverhalten hingegen nicht erkennbar. Im Scherversuch über-

wiegt in den verbleibenden Szenarien wie auch in den Referenzversuchen Glasbruch in Kombination mit Substratbrüchen und Faserausrisen auf der Holzseite. Eine Ausnahme bildet die Trocknung, nach der im Scherversuch vermehrt Holzbruch auftritt. Auch in den Zugversuchen versagen primär die Holzfügeteile. Hinzu kommen hier vereinzelte adhäsive Brüche, die aber nur bei Prüfkörpern aus Vollholz zu beobachten sind.

In Bezug auf das Bruchverhalten können dennoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Holzarten festgestellt werden. Nach identischer Alterung stellen sich ähnliche Bruchmuster ein. Aufschluss über eine Abhängigkeit der Bruch- von der Holzfestigkeit, könnten die Zugversuche an H-Prüfkörpern liefern, da hier meist das Fügeteil aus Holz versagte. Das Holz wird in diesem Fall senkrecht zur Faserichtung beansprucht. Entweder reißen einzelne Fasern oder sogar ganze Furnierlagen beziehungsweise größere Holzstücke aus der Oberfläche. Bereits vor der Alterung ließen sich für nolax C44.8505 etwas höhere Bruchfestigkeiten in Verbindung mit Sperrholz als mit Vollholz erzielen. Bei den Prüfkörpern, die mit Scotch-Weld DP 490 verklebt sind, verhält sich dies genau entgegengesetzt. In beiden Fällen bleiben diese Unterschiede auch nach Alterung bestehen. Die erreichte Bruchfestigkeit hängt somit nicht von der Holzart sondern vom Klebstoff ab. Über die Ursache kann jedoch nur spekuliert werden. Für eine eindeutige Aussage müsste die Interaktion zwischen dem Klebstoff und den oberflächennahen Schichten des Substrats näher analysiert werden.

6.4.6 Kriechverhalten

Das Kriechverhalten der drei Klebstoffe wurde in Langzeitversuchen unter konstanter Last untersucht. Ursprünglich waren drei Laststufen je Klebstoff vorgesehen. Nach Auswertung der Versuchsergebnisse aus dem ersten Durchlauf mit insgesamt 10 Proben, wurde das Versuchsprogramm angepasst. Der Klebstoff nolax C44.8505 wurde intensiver geprüft als Scotch-Weld DP 490, da sich die Daten aufgrund der sehr geringen Verformungen beim steifen Klebstoff Scotch-Weld DP 490 nicht in ausreichendem Maße verwerten lassen und somit weitere Versuche als nicht zielführend erachtet werden. Das Untersuchungsprogramm wurde detailliert in Abschnitt 6.3.6 besprochen.

Die Messergebnisse des Kamerasystems müssen für die Auswertung zunächst weiter aufbereitet werden, da die Anfangsverformung der Prüfkörper beim Belasten offenbar nicht korrekt erfasst wird. Die Verformungen, die direkt nach dem Belasten an den einzelnen Messstellen aufgezeichnet werden, unterscheiden sich bei sonst gleichen Prüfbedingungen und Materialkombinationen zum Teil deutlich und decken sich nicht mit den Werten aus den Scherversuchen bei Raumtemperatur (Abschnitt 6.4.1). Dieses Phänomen wurde bereits bei ähnlichen Versuchen beobachtet. Die vorgeschlagene Korrektur der Messergebnisse wird hier in Grundzügen übernommen.²⁵¹

Die gemessenen Gesamtverformung einer Probe Δx_{ges} setzt sich aus der Anfangsverformung Δx_0 und dem zeitabhängigen Verformungsanteil $\Delta x(t)$ zusammen:

$$\Delta x_{\text{ges}}(t) = \Delta x_0 + \Delta x(t)$$

Gleichung 17

Von diesen Messwerten wird die mutmaßlich fehlerhaft aufgezeichnete Anfangsverformung abgezogen und durch einen neuen theoretischen Startwert ersetzt. Da die Prüfkörper etwa zwei Sekunden nach Beginn der Kameraerfassung belastet werden, wird als Anfangswert der Verformung der Messwert zum Zeitpunkt $t = 5 \text{ s}$ gewählt. Die korrigierte Kriechverformung $\Delta x_{\text{kor}}(t)$ ergibt sich nach:

$$\Delta x_{\text{kor}}(t) = \Delta x_{\text{ges}}(t) - \Delta x_{\text{ges}}(t = 5 \text{ s}) + \Delta x_{0,\text{theor}}$$

Gleichung 18

Die theoretische Anfangsverformung $\Delta x_{0,\text{theor}}$ wird nach Gleichung 19 berechnet. Dabei gelten die in Bild 84 gezeigten Beziehungen. Der mittlere Schubmodul G_m wird als Anstieg der Regressionsgeraden im linearen Anfangsbereich der Schubspannungs-Gleitungs-Beziehungen aus den Scherversuchen bei Raumtemperatur²⁵² bestimmt. Tafel 11 fasst die Werte zusammen. Proben, die identisch belastet sind, weisen dann die gleiche Anfangsverformung auf.

²⁵¹ Vergleiche Ebert 2014, S. 135 ff.

²⁵² Repräsentative Messkurven siehe Bild 93 und Bild 94, Einzelmessungen siehe Anhang B Bild B.1, Bild B.9 und Bild B.45.

Gleichung 19

$$\Delta x_{0,\text{theor}} = d \cdot \frac{\tau}{G_{\text{rep}}}$$

Tafel 11

Schubmodul der repräsentativen Messkurve und der entsprechend berechnete Startwert der Anfangsverformung für jede Klebschicht.

Eigenschaft	Ottocoll® S660	nolax C44.8505	Scotch-Weld™ DP 490 ^a
Schubmodul G_{rep}	0,43 N/mm ²	9,10 N/mm ²	152,58 N/mm ²
$\Delta x_{0,\text{theor}}$ bei Lastniveau			
5 ($\tau \approx 70 \% R_{u,5}$)	–	0,50 mm	–
4 ($\tau \approx 55 \% R_{u,5}$)	–	0,40 mm	0,02 mm
3 ($\tau \approx 35 \% R_{u,5}$)	2,09 mm	0,23 mm	–
2 ($\tau \approx 10 \% R_{u,5}$)	0,70 mm	0,07 mm	–
1 ($\tau \approx 5 \% R_{u,5}$)	0,35 mm	–	–

Die auf diese Weise angepassten Ergebnisse²⁵³ der Kriechversuche sind in Form der Klebschichtgleitung in Bild 106 bis Bild 108 dargestellt. Bei der Auswertung wird darauf verzichtet, Füge teilverformungen durch eine Korrekturberechnung zu eliminieren. Längenänderungen der Füge teile, die durch die Lage der Messmarken zusammen mit der eigentlichen Klebschichtverformung erfasst werden, nehmen unter der aufgetragenen Dauerlast vernachlässigbare Werte an. Neben den individuellen Messungen zeigen die Diagramme eine Mittelwertkurve für jedes geprüfte Lastniveau. Die Mittelwerte werden nach vordefinierten Zeitschritten²⁵⁴ gebildet und führen zu einer Glättung des Kurvenverlaufs. Die drei untersuchten Klebstoffe weisen ein äußerst unterschiedliches Kriechverhalten auf.

Das Silikon Ottocoll S660 (Bild 106) verformt sich unter der aufgetragenen Last zunächst deutlich. Die beiden oberen Laststufen führen zu einer klar erkennbaren, zeitabhängigen Zunahme der Verformungen. Bei geringerer Schubbeanspruchung von 0,05 N/mm² sind dagegen keine Kriechverformungen mehr messbar. Bei den Laststufen 0,10 und 0,30 N/mm² wird nach 1000 Stunden eine Gesamtverformung erreicht, die etwa 20 % über dem Ausgangswert liegt.

²⁵³ Die unveränderten Messkurven können Anhang B entnommen werden.

²⁵⁴ Stützstellen der Mittelwertkurve: 1 min, 3 min, 6 min, 12 min, 30 min, 1 h, 2 h, 5 h, 10 h, 20 h, 50 h, 100 h, 200 h, 500 h, 1000 h.

Das Abflachen der Kriechkurven, das bei allen hier geführten Zeitstandversuchen an Scherprüfkörpern mit Silikonklebfuge zu beobachten ist, deutet darauf hin, dass der Kriechprozess nahezu zum Erliegen kommt. Über die letzten drei Wochen des Zeitstandversuchs (etwa 500 Stunden) nimmt die Kriechverformung bei allen untersuchten Laststufen nur noch um weniger als 0,1 mm zu. Der zeitabhängige Verformungsanteil liegt durchweg unter 1 mm ($\tan \gamma < 0,33$).²⁵⁵ Das Silikon zeigt folglich die schon bekannte hohe Nachgiebigkeit unter kurzzeitiger Lasteinwirkung und gleichzeitig ein moderates Kriechverhalten bei dauerhafter Belastung.

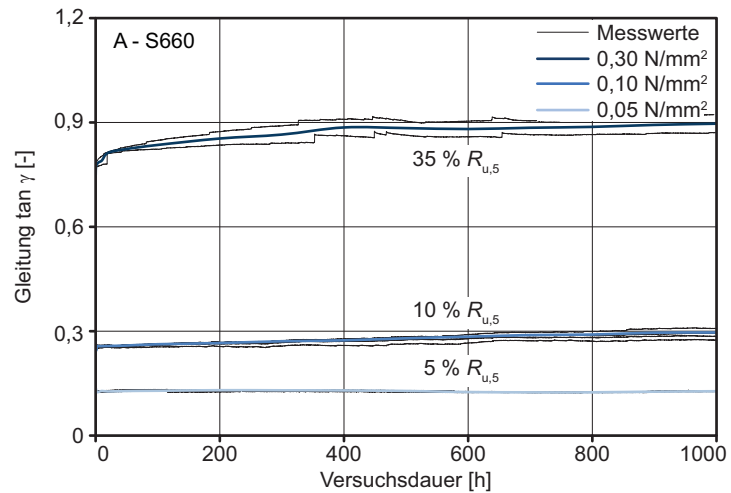
Bei der Belastung von Ottocoll S660 mit einer permanenten Schubspannung von 0,30 N/mm² fallen die plötzlichen Sprünge in den Kurvenverläufen der beiden Messkurven auf. Die Verformung der beiden parallel geprüften Proben nimmt in unregelmäßigen Abständen schlagartig zu. Danach folgt eine Relaxationsphase, bei der die Verformungen in geringem Umfang zurückgehen beziehungsweise auf einem Niveau verharren, bis erneut eine Zunahme der Kriechverformungen einsetzt. Die Sprünge treten allerdings nicht zum selben Zeitpunkt auf. Die Ursache wird auf nachträglich festgestellte Beschädigungen an den Zugstangen der beiden betroffenen Belastungsvorrichtungen zurückgeführt.²⁵⁶ Der prinzipielle Kurvenverlauf, den die geglättete Mittelwertkurve aus beiden Messungen darstellt, erscheint plausibel, sodass der Versuch dennoch verwertbare Ergebnisse liefert.

²⁵⁵ ift-Richtlinie VE-08/2, 1.3 definiert eine Verschiebung von $< 0,1$ mm, gemessen über einen zusammenhängenden Zeitraum von drei Wochen, als Abbruchkriterium für den Kriechversuch bei +55 °C. Die irreversiblen Kriechverformungen dürfen 1 mm nicht überschreiten.

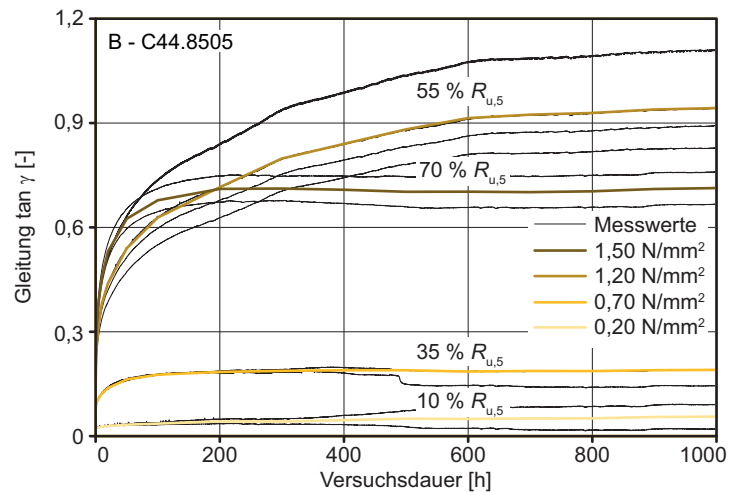
²⁵⁶ Eine Überprüfung der Messstellen ergab, dass die entsprechenden Zugstangen der Belastungsvorrichtung Kratzspuren und Furchen auf der Metalloberfläche aufwiesen. Die Belastung mittels Hebelsystem, wie sie an diesen Messstellen nur bei der Laststufe 0,30 N/mm² eingesetzt wurde, führt zu Querkraften auf die Linearführung. Die beschädigten Zugstangen können in diesem Fall nicht reibungsarm durch die Linearlager der Temperierkammer gleiten und es kommt zu ruckartigen Verschiebungen, wenn der Haftreibwiderstand überwunden wird. Die Schäden waren vermutlich bereits vor Versuchsbeginn vorhanden und beeinflussen das Messergebnis nur marginal. Bei Direktbelastung haben die Beschädigungen keinen erkennbaren Einfluss auf das Messergebnis. Es sind somit nur die beiden Messungen bei 0,30 N/mm² betroffen. Messkurven, die von anderen Prüfkörpern aus dem Prüfdurchlauf stammen, zeigen keine derartigen Störstellen. Äußere Einflüsse werden daher als Ursache ausgeschlossen.

Bild 106

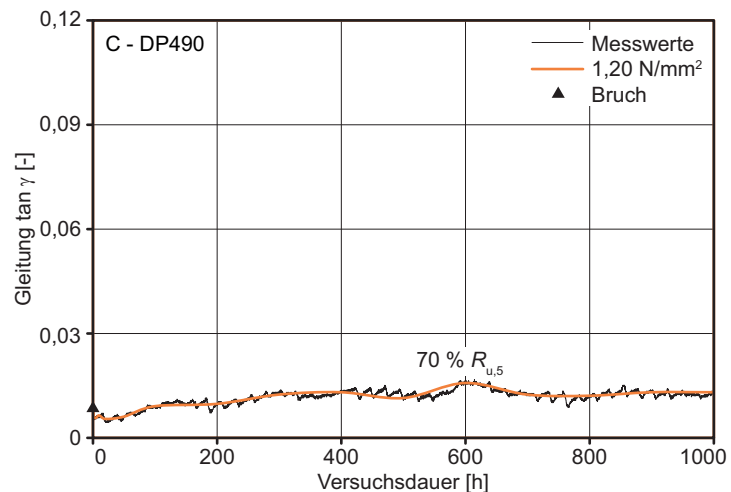
Kriechversuche an Zug-scherproben mit Ottocoll S660. Die gemittelten Kurven sind farbig dargestellt.

**Bild 107**

Kriechversuche an Zug-scherproben mit nolax C44.8505. Die gemittelten Kurven sind farbig dargestellt. An einem Prüfkörper (0,70 N/mm²) tritt nach etwa 500 Stunden ein unerklärlicher Sprung in der Messkurve auf. Die geglättete Kriechkurve basiert ab diesem Zeitpunkt nur noch auf den Messwerten des zweiten Prüfkörpers des gleichen Lastniveaus.

**Bild 108**

Kriechversuche an Zug-scherproben mit Scotch-Weld DP 490. Die gemittelten Kurven sind farbig dargestellt. Die gemessenen Verformungen liegen um mehr als eine Zehnerpotenz unter den Werten der beiden anderen Klebstoffe. Ein Prüfkörper versagt bereits nach weniger als einer Stunde durch Glasbruch. Eine Wiederholung dieses Versuchs war nicht möglich.



Die stark ausgeprägten zeitabhängigen Dehnungsvorgänge unterscheiden den modifizierten Epoxidharzklebstoff nolax C44.8505 (Bild 107) dagegen deutlich von den beiden anderen Klebstoffen. Aus dem unmittelbaren Belastungsvorgang resultieren zunächst relativ geringe Verformungen. Die permanent wirkende Scherbeanspruchung führt dann jedoch zu großen zeitabhängigen Deformationen, die zunächst zügig anwachsen, aber mit zunehmender Versuchsdauer gegen einen Grenzwert tendieren. Bei drei der untersuchten Spannungsniveaus beschränkt sich die entscheidende Zunahme der zeitabhängigen Verformungen auf den Anfangszeitraum von etwa 200 Stunden. Danach verläuft die Messkurve auf nahezu konstantem Niveau. Auch hier sind über die letzten 500 Stunden keine Zuwächse von mehr als 0,1 mm zu beobachten. Die prozentuale Verformungszunahme im Verhältnis zum Ausgangswert beträgt nach 1000 Stunden für die beiden unteren Laststufen von 0,20 und 0,70 N/mm² etwa 140 % und übersteigt die des Silikons um ein Vielfaches. Bei den beiden oberen Laststufen ist die Differenz zwischen Anfangs- und Endverformung noch wesentlich größer.

Die Prüfkörper, die mit einer permanenten Schubspannung von 1,20 N/mm² belastet werden, zeigen in dieser Gruppe ein außergewöhnliches Verhalten. Die Kriechverformungen fallen beispielsweise deutlich größer aus als bei der nächsthöheren Laststufe von 1,50 N/mm². Weiterhin verlangsamt sich der Kriechvorgang erst zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt. Eine eingehende Betrachtung der Versuchsparameter führt zu dem Schluss, dass ein Zusammenhang zum Alter der Prüfkörper besteht. Alle Kriechprüfkörper wurden zum gleichen Zeitpunkt hergestellt. Das vorgesehene Versuchsprogramm erforderte jedoch zwei aufeinanderfolgende Prüfzyklen. Somit lag das Herstellungsdatum der Proben des ersten Durchlaufs (Laststufe 1,20 N/mm²) etwa 40 Tage vor dem eigentlichen Versuchsbeginn, während die Proben des zweiten Durchlaufs (Laststufen 0,20 | 0,70 | 1,50 N/mm²) zunächst 120 Tage im Normalklimaraum lagerten, bevor sie geprüft werden konnten.

Die geringere Kriechneigung der länger gelagerten Proben deutet auf eine mögliche Nachvernetzung hin. Stärkere Bindungskräfte innerhalb der Polymermatrix könnten in diesem Fall das Abgleiten der Polymerketten unter Langzeitbeanspruchung vermindern. Die Ursache konnte jedoch in dieser

Arbeit nicht endgültig ermittelt werden, da hierfür weitere Untersuchungen zum Materialverhalten und zur chemischen Zusammensetzung des Klebstoffs notwendig wären.²⁵⁷

Die Kriechneigung des silanterminierten Epoxidharzklebstoffs ist wesentlich größer als die des Silikons. Vergleicht man aber die Gesamtverformungen, die nach 1000 Stunden aus ähnlichen Lastniveaus resultieren, dann liegen die Werte für nolax C44.8505 immer noch deutlich unter denen von Ottocoll S660. Trotz der großen Kriechverformungen wird die Verformungsobergrenze²⁵⁸ aus den Kurzzeitversuchen nicht erreicht. Langzeitbeanspruchte Klebschichten versagen in der Regel bei Erreichen einer für den Klebstoff spezifischen Verformungsgrenze.²⁵⁹

Der steife Epoxidharzklebstoff Scotch-Weld DP490 verformt sich nur sehr gering unter der aufgetragenen Dauerlast. Zeitabhängige Verformungen sind kaum noch messbar. Dennoch trat während des Kriechversuchs Glasbruch an einem der beiden Prüfkörper auf. Der zweite Prüfkörper versagte dann auf gleiche Weise beim Bestimmen der Restfestigkeit. Die Aussagekraft der Messergebnisse an Scotch-Weld DP 490 ist daher sehr begrenzt. Auf die Prüfung weiterer Laststufen wurde verzichtet.

6.4.7 Restfestigkeit nach Vorbelastung

Nach dem Entlasten der Prüfkörper wird in Zugscherversuchen deren Restfestigkeit ermittelt. Bis auf einen waren alle Prüfkörper nach dem Kriechversuch über 1000 Stunden intakt. Bei der Probe, die mit Scotch-Weld DP 490 verklebt war, versagte nach wenigen Stunden das Fügeglied aus Glas. Alle anderen konnten geprüft werden. Die Rückverformung,

²⁵⁷ Zur Überprüfung der Nachvernetzung könnte eine dynamisch-mechanische Analyse oder eine infrarotspektroskopische Analyse durchgeführt werden. FTIR-Untersuchungen an einem epoxidverstärkten Silyl-Klebstoff zeigen beispielsweise, dass bei Raumtemperatur ausgehärtete Proben nicht abreagierte Silanol- und Epoxidgruppen enthalten. (Vergleiche Graf 2004, S. 120 f.)

²⁵⁸ Die mittlere Bruchgleitung der mit nolax C44.8505 geklebten Scherprüfkörper beträgt bei Raumtemperatur $\tan \gamma = 2,5$ (Bild 93 und Anhang B, Tafel B.5).

²⁵⁹ Vergleiche Althof 1984, S. 161.

die sich in der Ruhephase zwischen Entlastung und Kurzzeitprüfung in der Klebschicht einstellt, kann vom Kamerasystem nicht erfasst und daher nicht quantifiziert werden. Es wird dennoch davon ausgegangen, dass irreversible Verformungen zurückbleiben, wie das Beispiel einer Probe mit dem Klebstoff nolax C44.8505 zeigt (Bild 109). An der mit einer hohen Dauerlast beanspruchten Probe ist eine bleibende Verformung auch noch mehrere Tage nach der Entlastung mit bloßem Auge erkennbar.

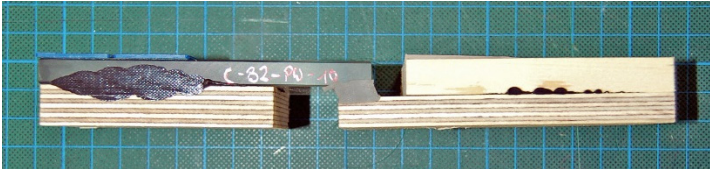


Bild 109

Irreversibel verformte Klebschicht aus nolax C44.8505 nach dem Kriechversuch bei $\tau = 1,50 \text{ N/mm}^2$.

Die beim Bruch der Klebschicht ermittelten Spannungen und Gleitungen sind in Bild 110 dargestellt. Als Referenz dienen die Scherversuche an Sperrholz-Glas-Prüfkörpern, die bei Raumtemperatur durchgeführt (Abschnitt 6.4.1) wurden. Zusätzlich zeigen repräsentative Messkurven das grundsätzliche Materialverhalten der vorbelasteten Prüfkörper.

Beim Silikon Ottocoll S660 ist kein wesentlicher Einfluss der Dauerlast auf die Festigkeit zu erkennen. Die ermittelten Bruchspannungen liegen im Bereich der Ausgangswerte der Referenzproben. Die Verformungsfähigkeit ist unverändert hoch. Alle Prüfkörper versagen kohäsiv (Bild 111, links). Somit treten auch beim Bruchbild keine Abweichungen zur Referenzprüfung an unbelasteten Proben auf.

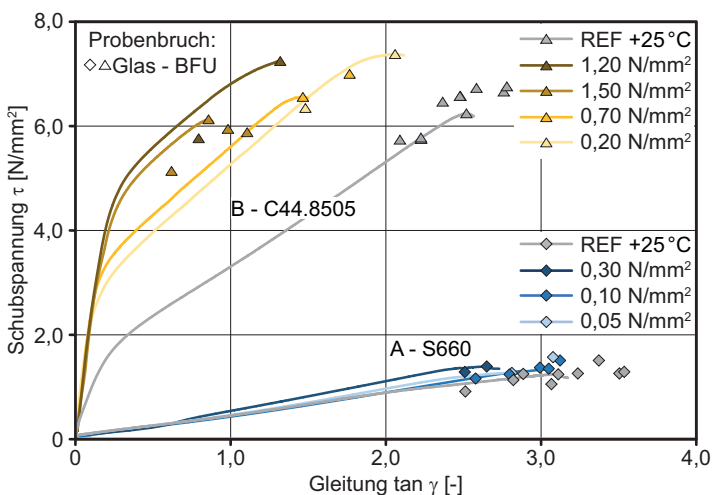


Bild 110

Schubspannungs-Gleitungs-Werte bei Versagen der Zugscherprüfkörper im Kurzzeitversuch nach Vorbelastung durch 1000 Stunden Kriechbelastung.

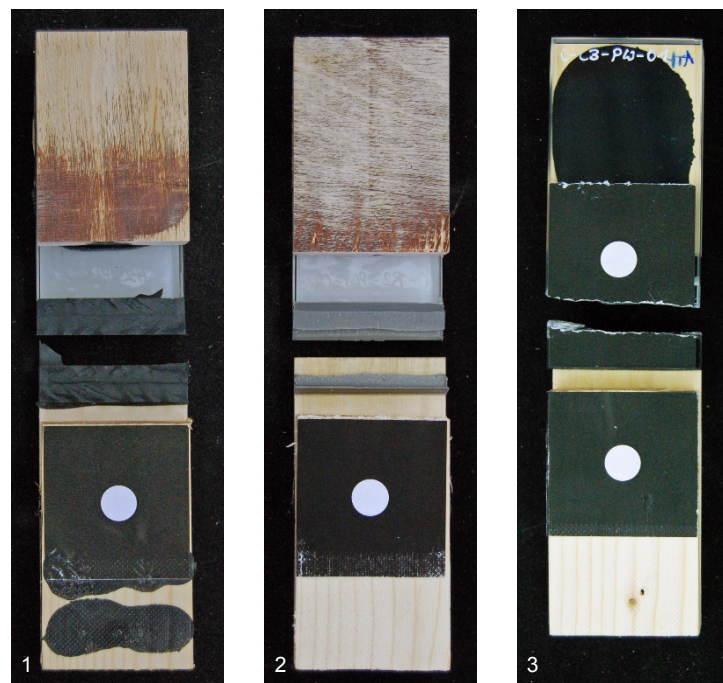
Im Vergleich dazu spricht nolax C44.8505 nach dem Kriechversuch etwas steifer auf die Belastung an. Der Übergang zwischen den beiden Steifigkeitsbereichen des bilinearen Materialverhaltens liegt auf einem höheren Spannungsniveau, als bei den Versuchen an unbelasteten Proben. Gleichzeitig nimmt die Verformungsfähigkeit der Klebschicht ab. Je höher das Lastniveau im Kriechversuch eingestellt wurde, desto geringer fällt das verbleibende Verformungsvermögen aus. Fließverformungen, die aus der ständigen Schubbeanspruchung resultieren, bleiben in der Klebung eingepreßt. Diese irreversible Vorverformung führt allerdings nicht zu einer entscheidenden Verminderung der Festigkeit. Die Bruchspannungen nehmen nur leicht gegenüber dem Referenzwert ab. Auch das Bruchbild wird davon nicht beeinflusst. Vorrangig wird Adhäsionsversagen auf dem Holz beobachtet. In geringem Umfang reißen Holzfasern aus. Neu sind kohäsive Bruchanteile (Bild 111, Mitte), die auf die geänderte Versuchskonfiguration zurückgeführt werden.

Der Prüfkörper mit Scotch-Weld DP 490 versagt im Zugscherversuch durch Glasbruch (Bild 111, rechts). Das Ergebnis ist daher nicht aussagekräftig und wird nicht dargestellt. Sämtliche Messergebnisse zu den Restfestigkeitsversuchen sind in Anhang B zusammengefasst.

Bild 111

Repräsentative Bruchbilder bei der Zugscherprüfung von Prüfkörpern, die in den Kriechversuchen vorbelastet wurden.

- 1 Ottocoll S660, kohäsives Versagen
- 2 nolax C44.8505, adhäsives Versagen auf Holz in Kombination mit kohäsivem Versagen
- 3 Scotch-Weld DP 490, Fügeteilbruch Glas



7 Experimentelle Untersuchungen an bauteilähnlichen Prüfkörpern

7.1 Untersuchungsprogramm und Methodik

7.1.1 Ziel der Untersuchungen

Alle bisher in dieser Arbeit vorgestellten experimentellen Untersuchungen beziehen sich auf das Klebstoffgrundmaterial oder labormaßstäbliche Klebverbindungen. Anhand dieser Resultate konnten die grundlegenden Eigenschaften und das Verformungsverhalten unterschiedlicher Klebstoffe bestimmt werden. Relativ kleine Klebschichten eignen sich gut für die Materialcharakterisierung. Bei einschnittig überlappenden Klebverbindungen fällt beispielsweise der Spannungsspitzenfaktor bei kleinen Überlappungslängen geringer aus.²⁶⁰ Dieser Faktor beschreibt das Verhältnis zwischen den Spannungsspitzen an den Klebfugenrändern und der mittleren Schubspannung in einer Klebschicht.

Der Spannungs- und Verformungszustand in der Klebung eines realen Bauteils ist dagegen wesentlich komplexer. Bei der ingenieurspezifischen Betrachtung geklebter Bauteile ist es daher von entscheidender Bedeutung, inwieweit sich die Kennwerte aus Laborversuchen auf die tatsächliche Situation der konkreten Konstruktionsaufgabe anwenden lassen. Dazu werden an Prüfkörpern mit bauteilähnlichen Abmessungen Kurz- und Langzeituntersuchungen durchgeführt. Besonderer Wert wird dabei auf eine praxisnahe Klebfugengestaltung gelegt. Die Konstruktionsprinzipien von Holz-Glas-Verbundelementen wurden bereits in Abschnitt 2.4 herausgearbeitet. Die Klebverbindung wird bei den aussteifenden Wandelementen aus Holz und Glas umlaufend ausgeführt. Bei Beanspruchung durch eine Horizontalkraft am Kopf eines solchen Wandelements wird die Klebung infolge des wirkenden Schubflusses vornehmlich in ihrer Längsrichtung beansprucht. Die Verbindung zwischen Verglasung und Holzunterkonstruktion stellt somit quasi eine einschnittige Schubverklebung mit sehr großer Überlappungslänge dar.

An dieser Stelle soll nun einerseits geklärt werden, welche Scherfestigkeit solche langen Klebfugen unter einer Last mit kurzzeitiger Einwirkungsdauer aufweisen und inwiefern sich

²⁶⁰ Vergleiche Brockmann 2005, S. 107.

diese von den Werten aus den Versuchen im Labormaßstab unterscheiden. Andererseits wird angestrebt, das Materialverhalten auch unter einer langandauernden Belastung genauer zu betrachten, was für einen Einsatz in einem tragenden Bauteil unerlässlich ist.

Bei der Untersuchung langer Klebfugen stellt die Nachgiebigkeit beziehungsweise das Verformungsvermögen des Klebstoffs einen entscheidenden Faktor dar. Die Fügeteilverformung führt bei steifen Klebstoffen, die nur eine geringe Deformation der Klebschicht zulassen, zu großen und im Allgemeinen für die Brucheinleitung maßgebenden Beanspruchungen an den Klebschichtenden. Elastomere Klebschichten, die eine große Nachgiebigkeit aufweisen, verhalten sich dagegen grundsätzlich anders. Die Spannungsverteilung ist vergleichsweise homogen. Die Tragfähigkeit erhöht sich daher nahezu proportional zur Überlappungslänge.²⁶¹ Bei viskoelastischen Materialien kommt es bei längerer Einwirkungsdauer der Beanspruchung zusätzlich zu einer zeitverzögerten Spannungsumlagerung infolge von Relaxationsprozessen. Daraus resultiert eine homogenere Spannungsverteilung und eine verbesserte Klebschichtausnutzung.²⁶² Aus diesem Grund soll hier das gleiche Klebstoffspektrum wie bei den Kleinteilproben berücksichtigt werden.

Ausgewählte Ergebnisse, die experimentell an Prüfkörpern unterschiedlicher Größe gewonnen wurden, werden in Kapitel 8 gegenübergestellt und diskutiert.

7.1.2 Materialien

Die in Kapitel 5 abgegrenzte und in Kapitel 6 im Labormaßstab untersuchte Klebstoffauswahl wird ebenso für die Studien an bauteilähnlichen Prüfkörpern herangezogen. Als Fügepartner dienen erneut Kalk-Natronsilicatglas und Furniersperrholz aus Birke, das in einigen der bisher umgesetzten Projekten mit Holz-Glas-Verbundbauteilen für die Adapterleiste eingesetzt wurde. Ein weiteres Material aus Vollholz wird nicht hinzugezogen, da keine grundlegende Änderung des Materialverhaltens der Klebschicht in Bezug auf diese Alternative erwartet wird. Bei den Versuchen im kleinen

²⁶¹ Vergleiche Habenicht 2006, S. 472 f.

²⁶² Vergleiche Habenicht 2006, S. 416 f.

Maßstab lassen sich zwar Festigkeitsunterschiede (Bild 90 und Bild 95) feststellen, die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen (Bild 93 und Bild 94) und die Versagensmuster (Bild 92) zeigten aber eindeutige Gemeinsamkeiten. Insbesondere in Bezug auf das Kriechverhalten der Klebschicht werden keine entscheidenden Abweichungen erwartet.

7.1.3 Großer Scherprüfkörper

Ziel der folgenden experimentellen Untersuchungen ist eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Klebfuge eines Wandelements. Bei diesen Bauteilen wird die Fuge im Wesentlichen durch eine Schubkraft in Längsrichtung beansprucht. Mit einem speziell für diese Versuche entwickelten großen Scherprüfkörper (Bild 112) soll diese Beanspruchung nachempfunden werden.²⁶³ Der Prüfkörper besteht aus einer rechteckigen Verglasung, die entlang ihrer Längskanten mit Leisten aus Birkenfurniersperrholz verklebt ist.

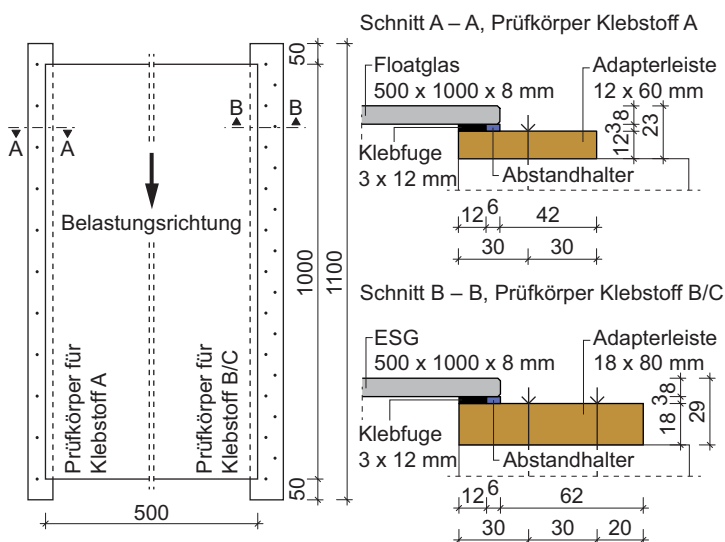


Bild 112

Großer Scherprüfkörper. In Abhängigkeit von der Klebfugensteifigkeit werden zwei Varianten verwendet, die die Steifigkeit des Klebstoffs berücksichtigen. Die Abmessungen der Verglasung und der Klebfuge sind dabei identisch.²⁶⁴

Variante 1 für Klebstoff A: Ottocoll S660 – schmale Adapterleiste und normalgekühltes Floatglas.

Variante 2 für Klebstoff B/C: nolax C44.8505/Scotch-Weld DP 490 – breite Adapterleiste und ESG.

²⁶³ Die Ergebnisse, die aus den experimentellen Untersuchungen an großen Scherprüfkörpern stammen, können auch auf andere Holz-Glas-Verbundelemente mit ähnlicher Klebfugegeometrie und Beanspruchung übertragen werden. Verbundträger nach Abschnitt 2.2.2 weisen beispielweise ebenso eine lange Klebfuge auf, die im Wesentlichen durch eine Schubkraft beansprucht wird.

²⁶⁴ Die Prüfkörpergeometrie wurde im Rahmen eines internationalen Verbundprojektes zum Holz-Glas-Verbund gemeinsam mit den beteiligten Forschungspartnern entwickelt. Zusätzliche Ergebnisse aus Langzeitversuchen an Prüfkörpern dieser Art, die nicht Teil dieser Arbeit sind, finden sich daher u. a. bei Fadai (2015, S. 344 f.).

Die Glasscheibe hat eine Größe von 500 x 1000 mm und weist eine Dicke von 8 mm auf. Entlang der vertikalen Kanten werden Adapterleisten aus Birkensterrholz auf die Rückseite der Scheibe geklebt. Die Fasern in der Deckschicht des Sterrholzes verlaufen in Längsrichtung. Die Abmessungen der Adapterleisten und die Art des Glases werden an die zu erwartenden Bruchlasten angepasst. Höhere Bruchlasten treten bei den Klebstoffen auf Epoxidharzbasis mit mittlerer oder hoher Steifigkeit auf. Eine elastische Klebverbindung mit Silikon hat im Vergleich dazu eine geringere Tragfähigkeit. Daher genügt es hier Floatglas und eine 12 mm dicke Adapterleiste mit einreihiger Schraubverbindung zum Prüfraumen einzusetzen. Die Prüfkörper für höhere Lasten bestehen dagegen aus Einscheibensicherheitsglas. In dem Fall weist die Adapterleiste einen kräftigeren Querschnitt auf und wird mit einer größeren Anzahl von Schrauben mit dem Prüfraumen verbunden. Die Fugengeometrie ist wiederum für alle untersuchten Klebstoffe gleich.

Der Prüfkörper wird an der oberen Glaskante belastet und in seiner Längsrichtung beansprucht. Daraus resultieren im Wesentlichen Schubspannungen in der linienförmigen Klebverbindung. Aufgrund der geringfügig exzentrischen Lasteinleitung können aber auch Normalspannungen infolge des Biegemoments entstehen. Die Abmessungen und die Gestalt der Klebfuge kommen der eines realen Bauteils sehr nah. Die Prinzipien wurden dazu bereits in den Grundlagenkapiteln erörtert (Abschnitt 2.4). Die Klebfuge misst im Querschnitt 12 x 3 mm. Die Dicke entspricht somit den Laborversuchen an kleinen Proben. Ein doppelseitig klebendes Abstandhalterband aus offenzelligem Polyurethanschaum (THERMALBOND® V2100), das bei Structural-Sealant-Glazing-Systemen verwendet wird, stellt eine gleichmäßige Klebfugendicke sicher und erleichtert das Herstellen. Das Material ist mit vielen Silikonklebstoffen chemisch verträglich.²⁶⁵ Die Verträglichkeit des Bands mit den beiden Epoxidharzklebstoffen wurde allerdings nicht gesondert überprüft. Über die Versuchsdauer traten keinen Anzeichen einer Unverträglichkeit auf. Um einen Einfluss der Haftfestigkeit des Klebebands auszuschließen, wird das Band nur auf dem Glas appliziert und die Abdeckfolie auf der anderen Seite belassen.

²⁶⁵ Vergleiche Thermalbond 2009.

7.1.4 Herstellung der Prüfkörper

Alle Prüfkörper wurden unter kontrollierten Umgebungsbedingungen in einer Werkhalle gefertigt. Die Vorgehensweise bei der Verarbeitung der Klebstoffe und das Raumklima entsprachen den Vorgaben der Klebstoffhersteller.²⁶⁶ Die Aushärtezeit vor Versuchsbeginn betrug mindestens 28 Tage.²⁶⁷ Der genaue Ablauf der Fügeteilvorbereitung und der Klebarbeiten wird nachfolgend wiedergegeben.

Zuerst wird die Glasscheibe auf einer Grundplatte positioniert, auf der zwei seitliche Anschlagleisten montiert sind. Die Atmosphärenseite des 8 mm dicken Glases zeigt nach oben zur Klebung. Die seitlichen Leisten haben eine Dicke von 11 mm. Somit beträgt die Höhendifferenz zum Glas genau 3 mm. Das entspricht der planmäßigen Klebfugendicke. Das Abstandhalterband wird parallel zu den Längskanten auf die Glasoberfläche geklebt. Die Abdeckfolie auf der Oberseite des doppelseitigen Klebebands wird nicht entfernt. Anschließend wird die Glasoberfläche, die später direkt an die Klebfuge angrenzt, mit einem Klebband maskiert, um überschüssigen Klebstoff sauber entfernen zu können (Bild 113). Darauf folgt das Reinigen der Kleboberflächen.



Bild 113

Vorbereitete Glasscheibe auf der Grundplatte. Es bleibt nur der Bereich der Glasoberfläche frei, der unmittelbar verklebt wird.

²⁶⁶ Die Prüfkörper wurden an drei verschiedenen Terminen gefertigt. Die Umgebungstemperatur lag an allen Produktionstagen zwischen +15 °C und +25 °C. Die relative Luftfeuchte betrug zwischen 30 und 40 %.

²⁶⁷ Die endgültige Aushärtezeit lag bei Versuchsbeginn aus logistischen Gründen zum Teil deutlich darüber.

Beim Glas erfolgt dies in zwei Arbeitsschritten. Zuerst trinkt man ein fusselfreies Tuch in Lösungsmittel und entfettet damit die Glasoberfläche. Mit einem zweiten, sauberen Tuch wird unmittelbar darauf überschüssige Flüssigkeit wieder aufgenommen. Das Verfahren ist als "Zwei-Tücher-Methode" bekannt und hat sich beim strukturellen Kleben von Glas bewährt.²⁶⁸

Die Leisten aus Birkenस्पerrholz werden für eine einfache Endbearbeitung der Klebfuge ebenso mit Klebebändern geschützt. Anhaftende Verschmutzungen werden soweit vorhanden mit einem trockenen Tuch abgerieben. Die freigelassene Sperrholzoberfläche wird kurz vor dem Fixieren und Kleben noch mit Druckluft von losen Partikeln befreit. Eine weitere Reinigung oder Vorbehandlung der porösen Furnieroberflächen erfolgt nicht.

Nach dem Vorbereiten und Reinigen der Fügeteile werden die Adapterleisten mit der Grundplatte verschraubt, auf der sich das Glas befindet. Der Klebprozess schließt unmittelbar daran an. Der Klebstoff wird dabei mit Druckluftpistolen aus handelsüblichen Zweikomponentenkartuschen verarbeitet. Die Mischqualität wird in regelmäßigen Abständen mithilfe von Schmetterlingstests²⁶⁹ überprüft. An den Spitzen der klebstoffspezifischen Statikmischrohre sind jeweils noch zusätzliche Flachdüsen befestigt. Diese Aufsätze ermöglichen ein sauberes und lunkerfreies Einbringen des Klebstoffs in die Fuge (Bild 114). Die Fugen werden kontinuierlich ohne häufiges Absetzen befüllt. Überschüssiges Material wird direkt im Anschluss mit einem Kunststoffspachtel abgezogen und die Fuge dabei geglättet (Bild 115). Unmittelbar danach werden die Abdeckbänder entfernt.

Die Einzelteile bleiben mindestens bis zur Transportfestigkeit der Klebung fixiert, die bei den verwendeten Klebstoffen spätestens nach 24 Stunden erreicht wird. Die Klebschichten härten bei Raumtemperatur aus, die aber in der Werkhalle stärker schwankte als im Normalklimaraum, wo die kleinen Prüfkörper gelagert wurden.

²⁶⁸ Vergleiche Dow Corning 2011, S. 25.

²⁶⁹ Der Test wird beispielsweise im SSG-Verarbeitungshandbuch von Dow Corning (2011, S. 33) beschrieben.



Bild 114

Seitliches Befüllen der Klebfuge. Auf dem Mischrohr sitzt eine Zusatzdüse mit abgeflachter Spitze, um den Klebstoff direkt in die Fuge applizieren zu können. Damit keine Hohlräume entstehen muss die Düse möglichst ein paar Millimeter in die Fuge eindringen. Das Mischrohr sollte dabei möglichst flach und im rechten Winkel zur Fuge geführt werden. Quillt in Arbeitsrichtung vor der Düse Material aus Fuge heraus, kann von einer vollständigen Verfüllung ausgegangen werden.



Bild 115

Abziehen des überschüssigen Klebstoffs. Die orange-farbenen Abdeckbänder werden direkt im Anschluss entfernt. Die Verarbeitungszeiten der Klebstoffe liegen zwischen 15 und 90 Minuten, sodass das Herstellen von Klebfugen von mehreren Metern Länge problemlos möglich ist.

7.1.5 Versuchsprogramm – Bauteilversuche

Die Versuchsserie an bauteilähnlichen Prüfkörpern gliedert sich in drei Versuchsphasen. Phase 1 umfasst Tragfähigkeitsversuche unter Kurzzeitbelastung, bei denen mindestens fünf Prüfkörper pro Materialkombination bis zum Bruch belastet werden. Aus den Ergebnissen lässt sich die charakteristische Scherfestigkeit der jeweiligen Klebschicht ableiten. Weiterhin werden die typischen Bruchbilder erfasst und die Bruchdehnung bewertet. In Phase 2 werden die restlichen Prüfkörper dann für 1000 Stunden einer konstanten Dauerlast ausgesetzt. Hierbei werden unterschiedliche Lastniveaus untersucht. An ausgewählten Prüfkörpern wird der Kriechversuch über einen längeren Zeitraum fortgesetzt. Die Ermittlung der Restfestigkeit nach der Entlastung markiert dann die letzte Phase. Die Versuchskonfiguration entspricht

der aus Phase 1. Sämtliche Versuche finden bei Raumtemperatur statt.

Die Schubspannungen, die im Kriechversuch in der Klebschicht wirken, werden auf Basis der charakteristischen Festigkeit $R_{u,5}$ aus den vorgeschalteten Kurzzeitversuchen berechnet. In der Regel werden jeweils vier Prüfkörper einer Materialkombination mit der gleichen Dauerlast beansprucht. Die insgesamt sechs Kriechprüfstände erlauben die simultane Prüfung von bis zu 12 Prüfkörpern. Tafel 12 fasst das komplette Untersuchungsprogramm an bauteilähnlichen Prüfkörpern zusammen. Vier aufeinanderfolgende Prüfzyklen à 1000 Stunden waren erforderlich. Die Kriechprüfung der Proben mit gleicher Materialkombination und Belastung erfolgt zumeist im selben Durchgang.

Tafel 12

Versuchsprogramm für die bauteilähnlichen Prüfkörper. In der Tabelle ist die Anzahl der untersuchten Prüfkörper (PK) und in Klammern die Versuchsdauer angegeben. Für die zusätzlichen Kriechuntersuchungen, die länger als die Regellaufzeit von 1000 Stunden andauern, konnte kein einheitliches Versuchsende festgelegt werden. Dies begründete sich aus der Versuchsabfolge und den verfügbaren Laborressourcen. Die Mindestlaufzeit dieser Versuche betrug 5000 Stunden.

Lastniveau	Ottocoll® S660	nolax C44.8505	Scotch-Weld™ DP 490 ^a
Anfangsfestigkeit $R_{u,5}$	5 + 1 PK	6 + 1 PK	6 + 1 PK
1 ($\tau \approx 5 \% R_{u,5}$)	4 PK (1000 h)	–	–
2 ($\tau \approx 10 \% R_{u,5}$)	4 PK (1000 h)	4 PK (1000 h)	–
3 ($\tau \approx 35 \% R_{u,5}$)	4 PK (1000 h)	2 PK (1000 h) 2 PK (> 5000 h)	–
4 ($\tau \approx 55 \% R_{u,5}$)	–	4 PK (1000 h) 2 PK (> 5000h)	4 PK (1000 h)
5 ($\tau \approx 70 \% R_{u,5}$)	–	2 PK (1000 h) 2 PK (> 5000 h)	2 PK (1000 h)

Der Silikonklebstoff wird vorzugsweise bei den unteren Laststufen geprüft, während die beiden steiferen Klebstoffe der Verbindung höheren Beanspruchungen ausgesetzt sind. Diese Festlegung wurde aufgrund der Unterschiede im Materialverhalten und der Ergebnisse aus den Versuchen mit kurzzeitig einwirkenden Lasten getroffen.

Laststufe 1 stellt den Bezug zu anderen Forschungsarbeiten zum Holz-Glas-Verbund her, bei denen Kriechversuche an

Silikonklebstoffen durchgeführt worden sind.²⁷⁰ Laststufe 2 berücksichtigt eine Verminderung der Beanspruchbarkeit bei langzeitigen Einwirkungen, die nach ETAG 002-1 gefordert wird. Bei einer konstanten Schubbeanspruchung der Klebung definiert die Richtlinie einen Kriechfaktor von $\gamma_c \geq 10$, durch den der Bemessungswert der Schubfestigkeit dividiert werden muss.²⁷¹ Laststufe 3 bildet mit gewissem Sicherheitsabstand die Situation bei dem in Kapitel 4 untersuchten Modellgebäude ab, wenn davon ausgegangen wird, dass die Klebfuge unter einer Lastkombination mit kurzer Einwirkungsdauer relativ stark ausgelastet ist. Die Lastermittlung für die Holz-Glas-Verbundfassade dieses Gebäudes ergab einen ständigen Lastanteil von etwa 20 % bezogen auf die insgesamt am Kopf des aussteifenden Elements wirkende Horizontalkraft.²⁷² Die weiteren Laststufen werden herangezogen, um zusätzliche Erkenntnisse jenseits dieser Grenzen zu gewinnen. Es wird dabei angenommen, dass die Leistungsfähigkeit der beiden Klebstoffe mit mittlerer und hoher Steifigkeit höher als die von Silikon ist, da bei den hier durchgeführten Versuchen häufig die Füge Teile versagten.

Wie schon bei den Versuchen im Labormaßstab wird nolax C44.8505 intensiver geprüft als die beiden anderen Klebstoffe, da er ein ausgeprägtes Kriechverhalten zeigt. Scotch-Weld DP 490 verformt sich dagegen auch bei hoher Belastung nur in geringem Maße. Von der Überprüfung der unteren Laststufen wird daher abgesehen.

Nach Abschluss der Kriechversuche werden die Prüfkörper entlastet und die verbleibende Tragfähigkeit ermittelt. Die Versuche zur Restfestigkeit erfolgen nach etwa sieben Tagen. Ein Vergleich der Ergebnisse aus Kurzzeitversuchen an unbelasteten Prüfkörpern und an vorbelasteten Prüfkörpern aus dem Kriechversuch erlaubt es, Auswirkungen der Langzeitbeanspruchung auf das Tragvermögen und den Einfluss möglicher irreversibler Schädigungen festzustellen.

²⁷⁰ Neubauer (2011, S. 38 ff.) führt Kriechversuche an zwei Silikonklebstoffen durch. Er definiert eine obere Kriechbelastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$. Die getesteten Silikone erreichen im Schubversuch charakteristische Bruchfestigkeiten von $R_{u,5} \approx 0,8$ bzw. $0,7 \text{ N/mm}^2$. Das Belastungsniveau im Kriechversuch entspricht somit näherungsweise 5 % $R_{u,5}$.

²⁷¹ Vergleiche ETAG 002-1, 5.1.4.6.8.

²⁷² Vergleiche Abschnitt 4.3.3 und Seeger 2015, S. 51 f.

7.2 Entwicklung eines Kriechprüfstands

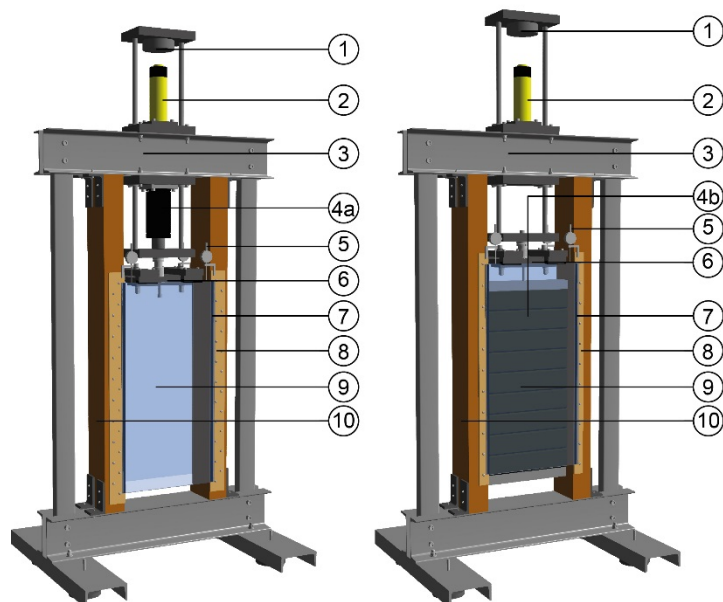
7.2.1 Prüfraumen

Für die Untersuchungen an den großen Scherprüfkörpern wurde ein spezieller Prüfstand (Bild 116) entwickelt. Die Prüfraumen können sowohl für Kriechversuche unter Dauerlast als auch für Tragfähigkeitsversuche unter Kurzzeitbeanspruchung verwendet werden. Der Prüfaufbau für den Kriechversuch ist derart konzipiert, dass zwei Prüfkörper gleichzeitig an einem Rahmen getestet werden können. Dazu werden die Prüfkörper von beiden Seiten gegen die Holzständer geschraubt, die in der Rahmenebene in den Prüfstand eingebaut sind. Die Dauerlast wird entweder durch Betongewichte oder eine entsprechend vorgespannte Gasdruckfeder erzeugt. Unterschiedliche Belastungssysteme waren notwendig, da sich aus dem großen Spektrum der Klebstoffeigenschaften ganz unterschiedliche Lastniveaus ergaben. Die verwendeten Gasdruckfedern lassen Vorspannkraft bis zu 70 kN zu, sind aber für geringe Beanspruchungen nicht geeignet. Im Gegensatz dazu werden die Betonblöcke bei Kräften bis 3 kN verwendet. Sechs gleichartige Prüfraumen (Bild 117) wurden eigens für diese Versuchsserie gebaut, um mehrere Kriechversuche parallel durchführen zu können. Eine modifizierte Variante des Rahmens, mit dem die Versuche zur Anfangs- und Restfestigkeit erfolgen, ist in Abschnitt 7.2.5 beschrieben.

Bild 116

Versuchsanordnung für Kriechversuche. Links: Belastung mit Gasdruckfeder, rechts: Belastung mit Betongewichten.

- 1 Kraftmessdose
- 2 Hydraulikpresse (zum Vorspannen der Feder/Heben der Gewichte)
- 3 Querhaupt
- 4 Belastungseinheit
 - a) Gasdruckfeder
 - b) Betongewichte
- 5 Digitale Messuhr
- 6 Gelenkige Lasteinleitungstraverse
- 7 Klebfuge
- 8 Adapterleiste aus Birkenperrholz
- 9 Verglasung
- 10 Holzständer



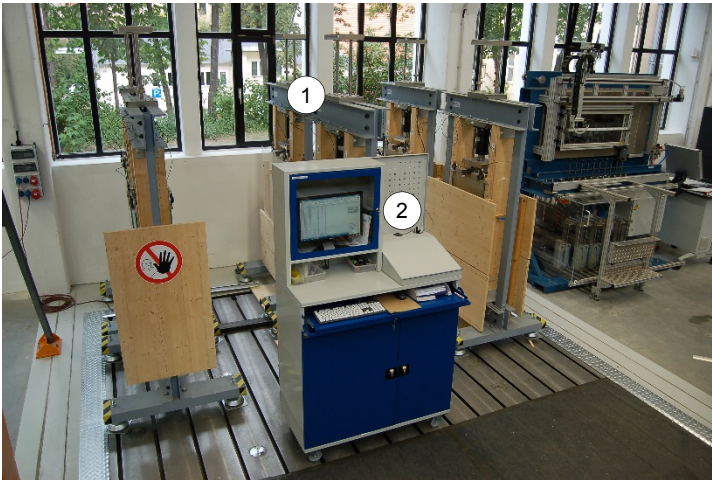


Bild 117

Versuchsanlage mit sechs Prüfraahmen für Kriechversuche. Die Sensoren an den einzelnen Prüfraahmen (1) sind mit einem zentralen Messrechner (2) verbunden, der in regelmäßigen Abständen die Messwerte automatisch aufzeichnet.

7.2.2 Lasteinleitung

Die Gasdruckfedern²⁷³ werden über Kopf am oberen Querschnitt befestigt und vor dem Versuch über eine hydraulische Presse auf die jeweilige Prüflast vorgespannt. Die Kennlinie der Feder wurde so gewählt, dass eine Verformung des Prüfkörpers nur zu einer geringen Änderung der ständigen Belastung führt. Die Kraft wird an jeweils zwei Punkten an der oberen Glaskante in den Prüfkörper eingeleitet (Bild 118 und Bild 119). Kunststoffklotze verhindern hier den direkten Kontakt zwischen Glas und dem Lasteinleitungssystem aus Edelstahl. Auf dem linken und rechten Klotz ruht jeweils eine Platte, die den Abstand zwischen den beiden Prüfkörpern, die simultan getestet werden, überbrückt. In der Mitte befindet sich jeweils eine Bohrung, durch die eine Zugstange geführt ist. An der Zugstange hängt eine weitere Platte, die quer zwischen den Prüfkörpern sitzt. Im Mittelpunkt dieser Quertraverse wird die Kraft aus der Gasdruckfeder eingeleitet. Dieses statisch bestimmte System aus Pendelstäben und Traversen erlaubt eine gleichmäßige Verteilung der Last auf alle vier Einleitungspunkte der zwei Prüfkörper.

²⁷³ Gasdruckfedern bestehen aus einem mit Stickstoff gefüllten Zylinder mit einer Kolbenstange und zeichnen sich durch den geringen Platzbedarf bei gleichzeitig hohen Federkräften aus. Im Unterschied zu Teller- oder Spiralfedern steht die volle Federkraft bereits zu Beginn des Kolbenhubes zur Verfügung. Über den gesamten Federweg ist die Kraftänderung gering. Das ist ein Vorteil für die Kriechversuche, bei denen zeitabhängige Verformungen der Probe zur Vergrößerung des Kolbenhubes führen. Die Federkraft kann über den Gasdruck eingestellt werden. Bei den verwendeten Federn liegt der Maximaldruck bei 150 bar.

Bild 118

Visualisierung und statisches System des Lasteinleitungsmechanismus. Gleichzeitige Belastung von zwei Prüfkörpern durch eine zentrale Belastungseinheit (Gasdruckfeder oder Betongewichte). Durch das gelenkige System aus Traversen und Zugstangen erhalten alle Einleitungspunkte die gleiche Last.

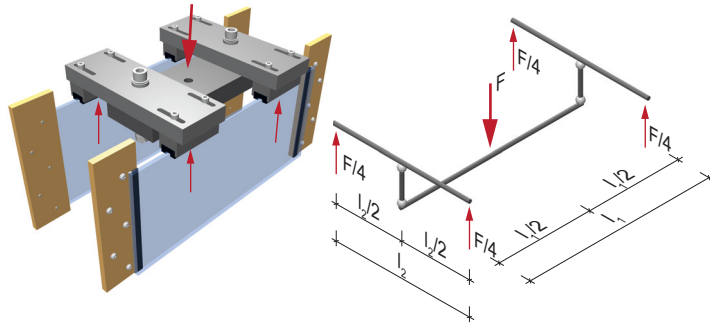
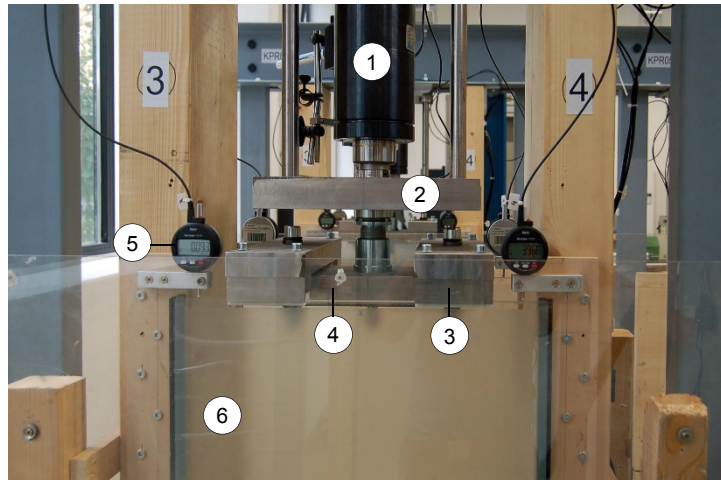


Bild 119

Detailaufnahme des Lasteinleitungsmechanismus für den Kriechversuch.

- 1 Gasdruckfeder
- 2 Grundplatte
- 3 Lasteinleitungsklotz
- 4 Quertraverse
- 5 Digitale Messuhr
- 6 Prüfkörper



7.2.3 Belastungsvorgang

Vor Versuchsbeginn wird über ein Ventil der erforderliche Druck in der Gasdruckfeder eingestellt. Die Federkraft verhält sich proportional zum Druck im Zylinder. Der Federkolben wird danach soweit hineingedrückt, bis die Prüfkraft erreicht ist. Hierfür wird ein manuell betriebener Hydraulikzylinder verwendet, der über ein Gestänge mit der Grundplatte unter der Feder verbunden ist (Bild 116 und Bild 119). Über diese Grundplatte schiebt die Hydraulikpresse den Federkolben nach oben. Eine Kraftmessdose wird zur Kontrolle der Pressenkraft genutzt. Anschließend werden die Prüfkörper von beiden Seiten gegen die Holzständer geschraubt und die zuvor beschriebene Lasteinleitungsvorrichtung – zunächst lastfrei – auf den oberen Glaskanten abgesetzt. Über ein höhenverstellbares Schraubelement wird dann eine schlupffreie Verbindung zwischen der Quertraverse und der Grundplatte unter der Feder hergestellt. Die Belastung der Prüfkörper erfolgt durch das Absenken des Hydraulikzylinders. Der Messvorgang wird kurz vorher gestartet.

Die Vorgehensweise bei der Belastung mit Betongewichten ist ähnlich. Die entsprechende Anzahl an Blöcken wird vor Montage der Prüfkörper aufgelegt. Das Gewicht des Stappels, der später zwischen den beiden Prüfkörpern hängt, wird ebenfalls mit der Hydraulikpresse angehoben und durch Kraftmessung überprüft. Die Gewichte werden wieder vorsichtig abgesetzt, nachdem die Prüfkörper angebracht sind und die Lasteinleitungsvorrichtung korrekt auf den Kanten aufliegt. Der weitere Versuchsablauf ist identisch.

7.2.4 Messtechnik und Monitoring

Die vertikale Verformung der Prüfkörper und die Klimadaten der Umgebungsluft werden im Stundenrhythmus durch ein automatisches Messsystem erfasst. Beim Belasten und in der Anfangsphase des Versuchs wird ein kürzeres Messintervall gewählt, um die erwartet zügige Verformungszunahme korrekt zu protokollieren. Zwei digitale Messuhren pro Prüfkörper zeichnen die Relativverschiebung zwischen den Adapterleisten und der oberen Glaskante in vertikaler Richtung auf (Bild 120). Bei einigen Versuchen sind Prüfstände zusätzlich mit einem kompakten Kraftmessring bestückt. Dieser sitzt direkt unter dem Kolben der Gasdruckfeder und erlaubt es, die Kraft über die gesamte Versuchsdauer zu überwachen. Hiermit wird überprüft, ob die voreingestellte Federkraft über den langen Belastungszeitraum annähernd konstant bleibt. Der Standardkriechversuch endet nach 1000 Stunden. Die Prüfkörper werden dann behutsam entlastet. Hierbei wird das Messintervall wieder erhöht und die Rückverformung der Prüfkörper bis zur Prüfung der Restfestigkeit aufgezeichnet.



Bild 120

Detailaufnahme der digitalen Messuhr. Diese misst kontinuierlich die Relativverschiebung des Prüfkörpers zwischen der oberen Glaskante und der Adapterleiste. Die Messsoftware liest die Daten in regelmäßigen Abständen über eine Kabelverbindung aus.

7.2.5 Modifikation für Kurzzeitversuche

Die Kurzzeitversuche zur Anfangs- und Restfestigkeit erfordern eine Anpassung des Prüfrahmens. In diesem Fall wird jeweils nur ein Prüfkörper in den Stahlrahmen eingebaut (Bild 121). Der Hydraulikzylinder, mit dem die Last in diesem Fall aufgebracht wird, befindet sich unterhalb des oberen Querhaupts des Rahmens. Die Kraft wird wie bei den Kriechversuchen an zwei Punkten in die obere Glas-kante eingeleitet. Die symmetrische Ausrichtung der Lasteinleitungsklotze und eine gelenkige Traverse sorgen für eine gleichmäßige Lastverteilung auf beide Klebfugen. Während des Versuchs werden die Kraft und die Verformungen des Prüfkörpers gemessen. Eine Kraftmessdose sitzt dazu direkt unter dem Zylinderkolben. Zwei Linearpotentiometer erfassen die relativen Verformungen der Klebschicht – ähnlich wie bei den Kriechversuchen. Sie befinden sich auf der linken und der rechten Koppelleiste des Prüfkörpers (Bild 122).

Bild 121

Versuchsanordnung für Tragfähigkeitsversuche unter Kurzzeitbeanspruchung.

Legende:

- 1 Querhaupt
- 2 Hydraulikpresse
- 3 Kraftmessdose
- 4 Wegaufnehmer (Linearpotentiometer)
- 5 Gelenkige Lasteinleitungstraverse
- 6 Klebfuge
- 7 Adapterleiste aus Birkenperrholz
- 8 Verglasung
- 9 Holzständer

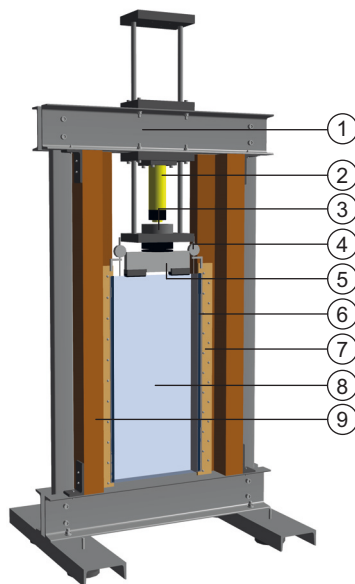
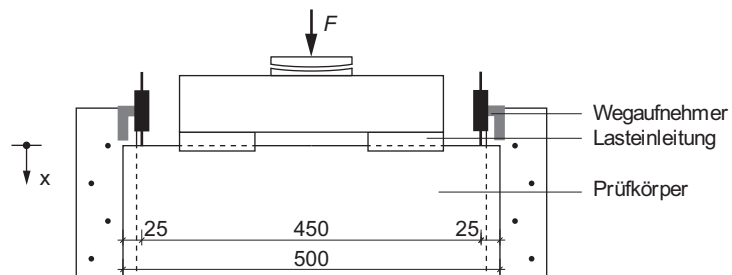


Bild 122

Lasteinleitungsprinzip und der Lage Messsensoren im Kurzzeitversuch.



An drei gesonderten Prüfkörpern – je einer pro Klebstoff – erfolgen Dehnungsmessungen auf der Glasscheibe. Die Positionen der Dehnungsmessstreifen (DMS) werden auf Basis einer numerischen Berechnung des Prüfkörpers (Bild 123) festgelegt. Die qualitative Spannungsverteilung im Glas wird zusätzlich dazu durch spannungsoptische Methoden erfasst. Die Lichtquelle mit Polarisator befindet sich hinter dem Prüfstand, die Kamera mit dem Polfilter davor.

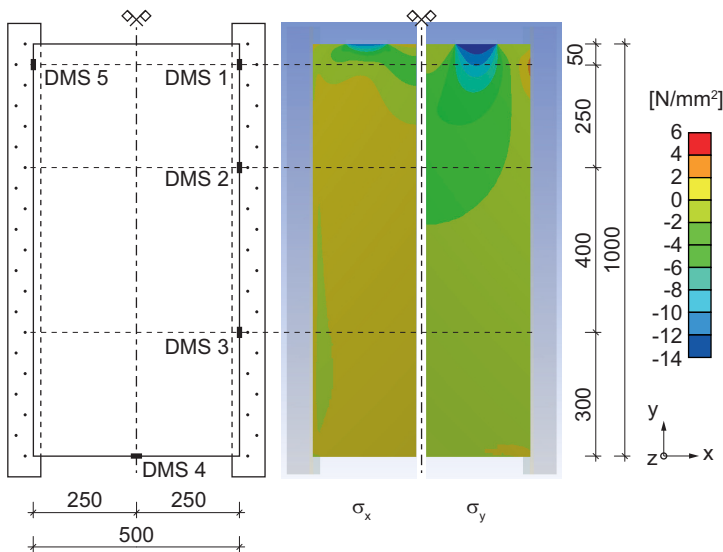


Bild 123

Positionen der Dehnungsmessstreifen (DMS) und Ergebnisse der numerischen Berechnung des Prüfkörpers nach Hinz (2015, S. 62). Das Verhalten der steifen Klebschicht wird vereinfacht mit einem linear elastischen Materialgesetz abgebildet. Dargestellt sind die Hauptzugspannungen im Glas bei einer Belastung des Prüfkörpers mit 20 kN. Die größten Zugspannungen treten wenige Zentimeter unterhalb des Klebfugenansatzes an der seitlichen Glaskante auf. Entlang dieser Kante werden drei DMS appliziert, um die Druck- und Zugspannungen zu erfassen.

7.3 Große Scherversuche unter Kurz- und Langzeit-einwirkung

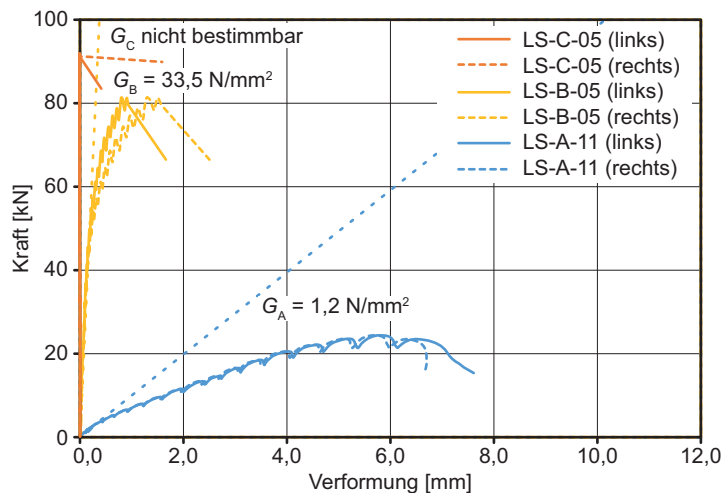
7.3.1 Tragfähigkeit bei kurzzeitiger Lasteinwirkung

Die Tragfähigkeit der Klebschicht wird an fünf Prüfkörpern mit dem Silikonklebstoff Ottocoll S660 und jeweils sechs Prüfkörpern mit den beiden Klebstoffen auf Epoxidharzbasis, nolax C44.8505 und Scotch-Weld DP 490 bestimmt. Alle Prüfkörper konnten bis zum Bruch belastet werden, ohne dass das Glas brach. Beide Klebfugen erfahren wie geplant eine gleichmäßige Beanspruchung. Die gemessenen Verformungen sind auf der linken und rechten Seite weitestgehend identisch (Bild 124). Erst kurz vor dem Bruch der Prüfkörper beginnen die Ergebnisse voneinander abzuweichen. Das gilt für alle drei Klebstoffe. Für die weitere Auswertung kann daher auch der aus den Messungen links und rechts gebildete Mittelwert herangezogen werden.

Die unterschiedliche Klebschichtsteifigkeit manifestiert sich im Anstieg der Messkurven der repräsentativen Prüfkörper. Insbesondere zu Versuchsbeginn verformen sich die Klebverbindungen aus Scotch-Weld DP 490 und nolax C44.8505 nur geringfügig. Mit der Laststeigerung verzweigen sich dann jedoch die beiden Kurven. Bei nolax C44.8505 nehmen ab etwa der Hälfte der Bruchlast die Verformungen überproportional zu. Die Kraft-Verformungs-Kurve verläuft nicht mehr linear. Ein Fließplateau bildet sich jedoch nicht aus. Bei Scotch-Weld DP 490 sind die Relativverschiebungen zwischen Holz und Glas wiederum so klein, dass die Wegaufnehmer sie kaum erfassen können. Teilweise überlagern Störeinflüsse aus der Verformung des Prüfrahmens die Messwerte und es werden geringe negative Verformungen gemessen. Die Bruchlasten der Klebstoffe mit hoher und mit mittlerer Steifigkeit liegen auf einem ähnlichen Niveau.

Bild 124

Repräsentative Kraft-Verformungs-Beziehung für die Klebstoffe Ottocoll S660 (A), nolax C44.8505 (B) und Scotch-Weld DP 490 (C). Die Grafik zeigt die Messungen des linken und rechten Wegaufnehmers sowie den Schubmodul im linearen Anfangsbereich der Kurven. Der wellenförmige Verlauf resultiert aus der manuell betriebenen Hydraulikpresse. Das Nachgeben des Prüfkörpers unter der aufgetragenen Last führt zu einem Nachschieben des Kolbens. Für die weiteren Ergebnisse siehe Anhang C.



Der Silikonklebstoff verhält sich im Vergleich dazu wesentlich nachgiebiger. Zum Zeitpunkt des Bruchs beträgt die Verformung des Prüfkörpers etwa 6 mm. Das ist ein Vielfaches der Verformung, die bei den anderen beiden Klebstoffen gemessen wurde. Die Bruchkraft erreicht dabei nur rund ein Viertel des Werts der anderen Klebstoffe.

Sämtliche Klebungen aus Silikon versagen kohäsiv. Der Prozess setzt mit dem Aufreißen einer der beiden Klebfugen ein. An der betroffenen Seite nehmen die Verformungen dadurch stärker zu und die Verglasung beginnt zu rotieren. Auf der anderen Seite stagnieren daraufhin die Verformungen, bis auch diese Klebfuge durch das Verdrehen versagt.

Bei den beiden steifen Klebstoffen treten dagegen ausschließlich Holzbrüche auf. An welcher Seite der Bruch initiiert wird, kann nicht zweifelsfrei festgestellt werden, da beide Fugen in der Regel simultan brechen. Zum Teil reißen einzelne Fasern aus der obersten Sperrholzlage heraus oder die gesamte Schicht wird abgeschält (Bild 125). Der Klebstoff selbst bleibt dabei intakt. Adhäsive Brüche sind nicht zu beobachten. Mit der Versteifung des Systems durch die beiden höherfesten Klebstoffe bildet der Bruch des Fügepartners Holz das maßgebende Versagenskriterium.

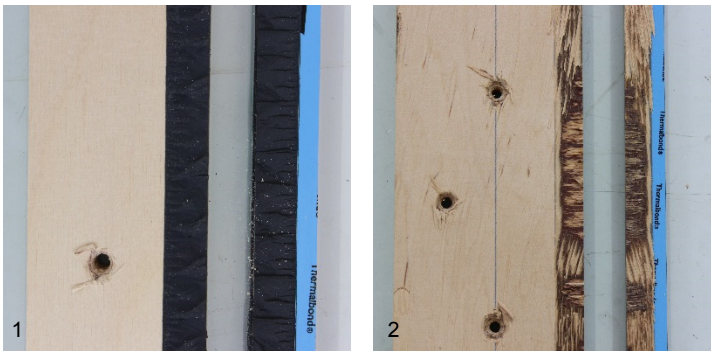


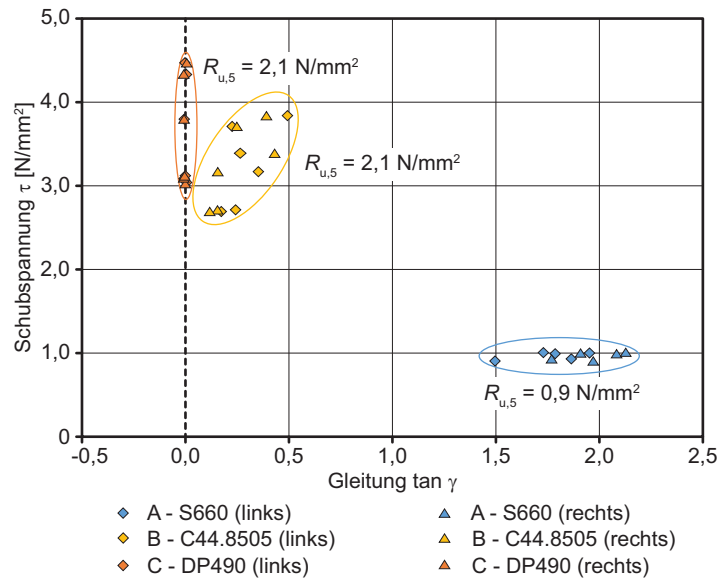
Bild 125

Typische Bruchbilder für die Klebstoffe Ottocoll S660 (1) und nolax C44.8505 (2). Die Silikonklebung versagt kohäsiv. Beim modifizierten Epoxidharzklebstoff bricht das Sperrholz. Das Bruchbild bei Scotch-Weld DP 490 gleicht dem von nolax C44.8505 und ist daher nicht dargestellt.

Die maximalen Spannungen und die zugehörigen Klebschichtverformungen aus den Belastungsversuchen werden in Bild 126 miteinander verglichen. Aus einem einzelnen Versuch stammen je zwei Datenpunkte im Diagramm, da die Verformungen auf der rechten und linken Seite des Prüfkörpers gemessen werden. Tafel 13 listet die gemittelten Messwerte auf. Zusätzlich ist die charakteristische Festigkeit als 5-Prozent-Quantilwert ($R_{u,5}$) angegeben.²⁷⁴ Die Angaben basieren auf der Annahme einer gleichmäßigen Schubspannungsverteilung in der Klebschicht. Die Gleitung $\tan \gamma$ wird direkt aus der Verformung bestimmt, in dem diese durch Klebfugendicke dividiert wird. Das entspricht der Vorgehensweise bei den Schubversuchen im Labormaßstab (Bild 84). In diesem Fall ist allerdings die Klebfugenlänge deutlich größer und die Klebfugenbreite im Vergleich dazu gering. Am Anfang und am Ende der Klebschicht können Spannungsspitzen entstehen, die zum Teil deutlich über den angegebenen mittleren Schubspannungen liegen.

²⁷⁴ Für weitere Erläuterungen vergleiche Abschnitt 6.1.4, in dem die Berechnung der charakteristischen Festigkeit auf Basis von ETAG 002-1, 6.1 beziehungsweise ift-Richtlinie VE-08/2, 1.1 bereits beschrieben ist.

Bild 126
 Kurzzeitversuche an großen Scherprüfkörpern. Maxima der Schubspannung und der Gleitung. Die 5-Prozent-Quantilwerte ($R_{u,5}$) wurden nach ETAG 002-1 unter Annahme einer normalverteilten Stichprobe bestimmt.



	Ottocoll® S660				nolax C44.8505				Scotch-Weld™ DP 490			
	F_{max} [kN]	Δx [mm]	τ_{max} [N/mm²]	$\tan \gamma$ [-]	F_{max} [kN]	Δx [mm]	τ_{max} [N/mm²]	$\tan \gamma$ [-]	F_{max} [kN]	Δx [mm]	τ_{max} [N/mm²]	$\tan \gamma$ [-]
PK-Nr. 1	21,8	5,2	0,91	1,73	81,4	1,0	3,39	0,35	74,3	-0,016	3,10	-0,005
PK-Nr. 2	22,5	5,5	0,94	1,82	89,1	0,7	3,71	0,24	104,0	0,002	4,33	0,001
PK-Nr. 3	24,1	5,8	1,01	1,93	76,1	0,8	3,17	0,26	73,0	0,015	3,04	0,005
PK-Nr. 4	24,3	5,8	1,01	1,93	65,2	0,6	2,72	0,20	107,3	0,012	4,47	0,004
PK-Nr. 5	23,9	5,8	1,00	1,93	92,2	1,3	3,84	0,44	91,2	-0,012	3,80	-0,004
PK-Nr. 6	—	—	—	—	64,7	0,4	2,70	0,15	74,9	0,001	3,12	0,000
X_{mean}	23,3	5,6	0,97	1,87	78,1	0,8	3,25	0,27	87,4	-0,007	3,64	0,00
σ_X			0,05				0,49				0,65	
$\tau_{\alpha\beta}$	n = 5		2,464		n = 6		2,336		n = 6		2,336	
$R_{u,5}$			0,86				2,12				2,12	

Tafel 13
 Kurzzeitversuche an großen Scherprüfkörpern. Die Werte der repräsentativen Prüfkörper (Bild 126) sind fett hervorgehoben.

Die in Tafel 13 angegebene Prüfkraft wirkt auf zwei Klebfugen. Die Spannung ergibt sich daher aus der Division dieser Kraft durch die Summe der beiden Klebflächen. Die Klebung aus Silikon versagt im Mittel bei einer Schubbeanspruchung von $\tau_{max} = 1,0 \text{ N/mm}^2$ und einer Gleitung von $\tan \gamma_{max} = 1,9$. Die Bruchspannungen der beiden epoxidharzbasierten Klebstoffe nolax C44.8505 und Scotch-Weld DP 490 liegen nicht weit auseinander, obwohl letzterer eine wesentlich höhere

Steifigkeit aufweist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass es einen Grenzwert für die Beanspruchbarkeit der Klebverbindung gibt, der nicht allein auf die Festigkeit des Klebstoffs zurückzuführen ist. Aufgrund des ähnlichen Bruchbildes – die Prüfkörper versagen durch Abschälen der oberen Furnierschicht der Adapterleiste – wird vermutet, dass die Holzfestigkeit zur maßgebenden Einflussgröße wird. Die mittleren Bruchspannungen ergeben sich für beide Klebstoffe zu etwa $3,3 \text{ N/mm}^2$ beziehungsweise $3,6 \text{ N/mm}^2$. Aufgrund der etwas größeren Streuung der Messwerte bei Scotch-Weld DP 490 ergibt sich für beide eine nahezu identische charakteristische Festigkeit von etwa $2,1 \text{ N/mm}^2$.

7.3.2 Spannungsverteilung im Glas

Die spannungsoptische Betrachtung der Verglasung durch den Polfilter der Kamera ermöglicht eine erste Einschätzung der qualitativen Spannungsverteilung im Glas.²⁷⁵ In Bild 127 sind diese Aufnahmen von drei unterschiedlichen Prüfkörpern bei einer Belastung von 20 kN zu sehen. Die Verglasung wird dabei mit polarisiertem Licht durchleuchtet. Der Analysator (Polfilter der Kamera) ist um 90° gegenüber dem Polarisator (Folie vor der Lichtquelle) verdreht.

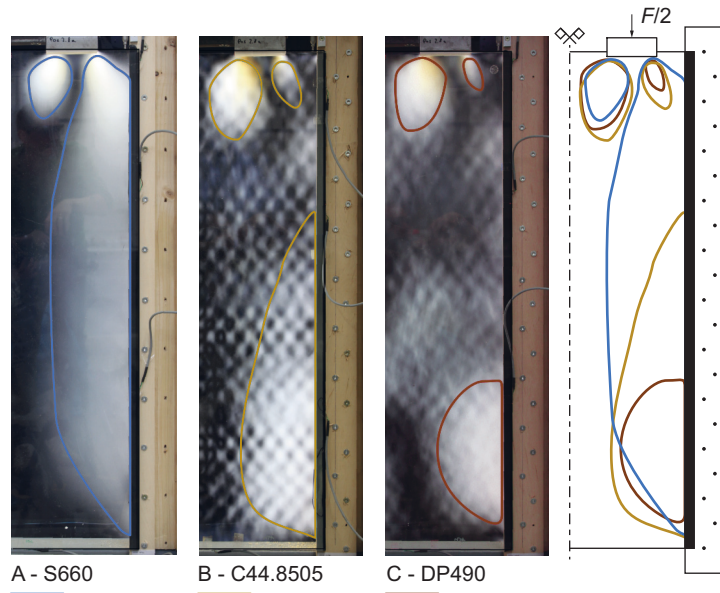
Bei dieser Anordnung erscheinen spannungsfreie Bereiche beziehungsweise Bereiche, in denen die Hauptspannungsdifferenz gerade Null ergibt, schwarz. Helle oder farbige Zonen markieren Stellen, bei denen die Differenz aus beiden Hauptspannungen relativ groß ist.²⁷⁶ In den Polarisationsfilteraufnahmen ist die Grenze zwischen dunklen und hellen Zonen farbig markiert. Unterhalb der Lasteinleitung decken sich diese Linien näherungsweise. Entlang der vertikalen Glaskante lassen sich aber Unterschiede feststellen, die auf abweichende Spannungsverteilungen hindeuten. Die Steifigkeit der Klebung kann diese Unterschiede hervorrufen. Die gleichmäßig weiße Färbung in der Kantenzone lässt beim nachgiebigen Silikonklebstoff eine homogene Spannungsverteilung über die gesamte Länge der Klebfuge vermuten.

²⁷⁵ Die physikalischen Grundlagen zur Spannungsoptik werden u. a. bei Wolf (1976) erläutert.

²⁷⁶ Vergleiche Weller 2013a, S. 177 f.

Bild 127

Polarisationsfilteraufnahmen der Verglasung bei einer Belastung von 20 kN nach Hinz (2015, S. 79). Die Bilder zeigen die rechte Hälfte der symmetrischen Prüfkörper. In Abhängigkeit vom verwendeten Klebstoff verteilen sich die Bereiche mit einer großen Hauptspannungsdifferenz (weiße Färbung) und die Bereiche mit einer Hauptspannungsdifferenz gleich Null (schwarze Färbung) auf unterschiedliche Weise. Die Grenzlinien werden durch visuelle Beurteilung des Fotos festgelegt und stellen eine subjektive Einschätzung dar.

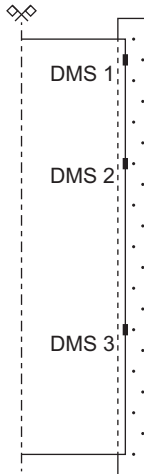


Das schachbrettartige Muster bei den Glasscheiben, die mit einem der beiden steiferen Klebstoffe nolax C44.8505 und Scotch-Weld DP490 verklebt sind, resultiert allerdings aus der Glasart. Das hier verwendete Einscheibensicherheitsglas weist einen inhomogenen Eigenspannungszustand auf.²⁷⁷ Das Muster ist eine Folge des Anblasens im Vorspannprozess.

Weitere Erkenntnisse zur Spannungsverteilung im Glas ergeben sich aus der Dehnungsmessung. Die symmetrisch angeordneten DMS 1 und 5 liefern sehr ähnliche Ergebnisse für alle drei Klebstoffe. Dadurch wird bestätigt, dass sich die Last wie geplant auf die beiden parallelen Klebfugen des Verbundelements verteilt.²⁷⁸ Die aus den Dehnungsmesswerten an der vertikalen Glaskante berechneten Spannungen sind in Abhängigkeit von der Prüfkraft in Bild 128 dargestellt. Die Spannungen nehmen annähernd proportional zur Last zu. Nur bei nolax C44.8505 lassen sich bei hohen Belastungen kurz vor dem Versagen nichtlineare Kurvenverläufe erkennen. An der oberen Messposition (DMS 1) treten

²⁷⁷ Bei einer homogen und symmetrisch vorgespannten Scheibe heben sich im unbelasteten Zustand die Lichtbrechungen beim Strahldurchgang durch die Scheibe auf. Die Polarisationsfilteraufnahmen zeigen dann keine Farbverläufe. (Vergleiche Weller 2013a, S. 179 f.)

²⁷⁸ Vergleiche Hinz 2015, S. 75.



Die Höhe der konstanten Schubbeanspruchung im Kr

Tafel 14

Lastniveaus für die Kriechversuche. Der in Prozent angegebene Anteil der Anfangsfestigkeit dient in erster Linie der Anschaulichkeit bei der Auswertung und dem Vergleich der Ergebnisse von unterschiedlichen Klebstoffen. Die Angaben werden daher in fünf Prozentschritten gerundet.

Lastniveau	Ottocoll® S660	nolax C44.8505	Scotch-Weld™ DP 490 ^a
Anfangsfestigkeit $R_{u,5}$	0,86 N/mm ²	2,12 N/mm ²	2,12 N/mm ²
1 ($\tau \approx 5 \% R_{u,5}$)	0,05 N/mm ²	–	–
2 ($\tau \approx 10 \% R_{u,5}$)	0,10 N/mm ²	0,20 N/mm ²	–
3 ($\tau \approx 35 \% R_{u,5}$)	0,30 N/mm ²	0,70 N/mm ²	–
4 ($\tau \approx 55 \% R_{u,5}$)	–	1,20 N/mm ²	1,20 N/mm ²
5 ($\tau \approx 70 \% R_{u,5}$)	–	1,50 N/mm ²	1,50 N/mm ²

Sämtliche Prüfkörper hielten der Dauerbelastung über die Regellaufzeit von 1000 Stunden stand. Bei allen Klebungen vermindert sich mit der Zeit die Verformungsgeschwindigkeit. Tertiäres Kriechen²⁷⁹ konnte in diesem Zeitraum bei keinem der untersuchten Klebstoffe beobachtet werden. Die Klebschichten waren nach der Entlastung augenscheinlich noch intakt.

Die Klebungen mit Ottocoll S660 und mit nolax C44.8505 verformen sich unter der aufgetragenen Last zunächst elastisch (Bild 129 und Bild 130). Mit Fortschreiten der Belastungszeit wachsen die Verformungen weiter an – beim ersten moderat, beim zweiten Klebstoff relativ deutlich. Die Geschwindigkeit, mit der die Dehnungen steigen, nimmt allerdings mit der Zeit ab. Nach 1000 Stunden wurde die Mehrzahl der Prüfkörper entlastet und anschließend die verbleibende Tragfähigkeit bestimmt. Beim Entfernen der Last geht der elastische Anteil der Verformungen sofort zurück. Darauf folgt eine weitere, zeitabhängige Rückverformung. Dieser Prozess war bis zur Tragfähigkeitsprüfung, die etwa sieben Tagen später durchgeführt wurde, noch nicht vollständig abgeschlossen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine irreversible Verformung der Klebfuge bestehen bleibt. Unverkennbare Schwankungen in den Kurvenverläufen gehen auf Einflüsse aus der Temperatur und Luftfeuchte zurück. Das Umgebungsklima veränderte sich jahreszeitenbedingt in der beheizbaren aber nicht klimatisierten Prüfhalle.

²⁷⁹ Als tertiäres Kriechen wird u. a. bei Habenicht (2006, S. 288 f.) die beschleunigte Zunahme der zeitabhängigen Verformungen beschrieben. Diese Phase leitet den Bruch ein, da das Verformungsvermögen der Polymerstruktur erschöpft ist.

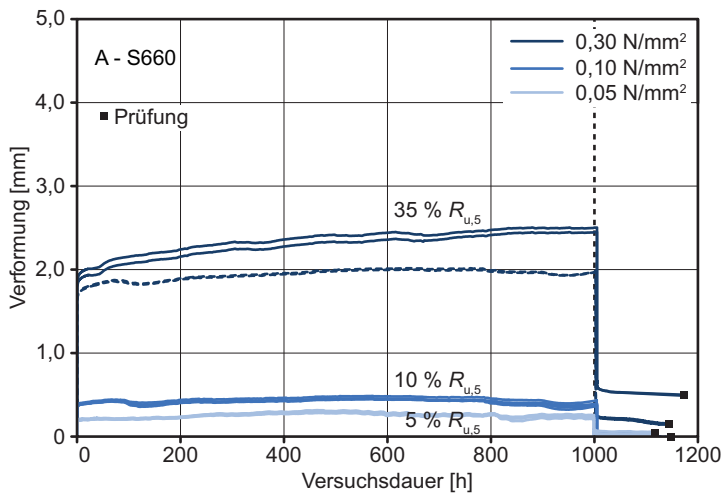


Bild 129

Kriechverformung der bauteilähnlichen Prüfkörper bei Ottocoll S660.

Jede Kurve stellt den Mittelwert aus der linken und rechten Verformungsmessung an einem Prüfkörper dar. Die gestrichelten Linien markieren Kriechversuche, bei denen eine geringere Durchschnittstemperatur herrschte als bei den anderen Proben der gleichen Lastgruppe.

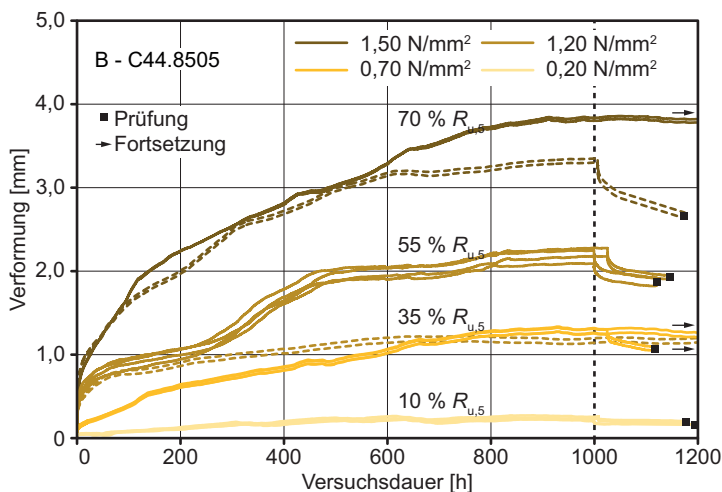


Bild 130

Kriechverformung der bauteilähnlichen Prüfkörper bei nolax C44.8505.

Jede Kurve stellt den Mittelwert aus der linken und rechten Verformungsmessung an einem Prüfkörper dar. Die gestrichelten Linien markieren Kriechversuche, bei denen eine geringere Durchschnittstemperatur herrschte als bei den anderen Proben der gleichen Lastgruppe.

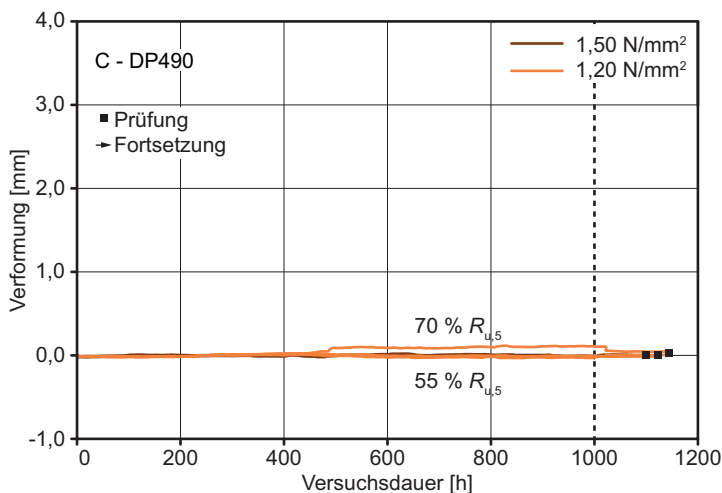


Bild 131

Kriechverformung der bauteilähnlichen Prüfkörper bei Scotch-Weld DP 490.

Jede Kurve stellt den Mittelwert aus der linken und rechten Verformungsmessung an einem Prüfkörper dar.

Eine Ausnahme zu den zuvor beschriebenen Beobachtungen bildet der Klebstoff Scotch-Weld DP490. Selbst bei hohen Lasten sind hier die Verformungen so gering, dass sie von den Messuhren kaum erfasst werden können (Bild 131). Die Interpretation des Messergebnisses ist daher schwierig. Ein Kriechen des Materials kann nicht festgestellt werden.

Bei den Klebungen aus Silikon treten zu Versuchsbeginn die größten elastischen Verformungen auf (Bild 129). Die Verformungen, die sich unmittelbar nach der Belastung einstellen, sind mit den Beobachtungen aus dem Tragfähigkeitsversuch vergleichbar.²⁸⁰ Die Anfangswerte werden folglich vom Messsystem gut erfasst. Im weiteren Verlauf zeigt sich, dass die zeitabhängigen Kriechverformungen moderater zunehmen als beim modifizierten Epoxidharzklebstoff nolax C44.8505. Nach 1000 Stunden Belastungsdauer liegt die Verformung der Silikonfugen etwa 40 bis 70 % über dem Wert vom Versuchsbeginn. Im Gegensatz dazu wird für den Epoxidharzklebstoff mit mittlerer Steifigkeit (Bild 130) der zehn- bis zwanzigfache Wert der elastischen Anfangsverformung erreicht. Das Material offenbart ein ausgeprägt zeitabhängiges Verhalten. Trotz dieses deutlichen Unterschieds ist die Summe aus elastischen, viskoelastischen und viskosen Verformungsanteilen für diesen Klebstoff kleiner als beim Silikon, wenn das gleiche prozentuale Beanspruchungsniveau zum Vergleich herangezogen wird.

Zeitgleich durchgeführte Versuche eines Prüfloses zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Die jeweils vier individuellen Messkurven verlaufen annähernd deckungsgleich, obwohl immer nur eine Gasdruckfeder zwei Prüfkörper gemeinsam belastet. Die Belastung funktioniert folglich zuverlässig.²⁸¹ Im Gegensatz dazu offenbaren die Versuche, die

²⁸⁰ Das Spannungsniveau von $0,10 \text{ N/mm}^2$ entspricht zum Beispiel einer Belastung des Prüfkörpers mit einer Einzellast von $2,4 \text{ kN}$. Unter dieser Last verformt sich die Klebschicht im Tragfähigkeitsversuch (Abschnitt 7.3.1) um etwa $0,3 \text{ mm}$. Beim Kriechversuch stellen sich direkt nach der Belastung gleiche Werte ein.

²⁸¹ Die Federkraft wurde zusätzlich an zwei ausgewählten Prüfständen überwacht. Die Messergebnisse zeigen, dass die Gasdruckfedern gut geeignet sind, um eine konstante Belastung über die Versuchsdauer aufrechtzuerhalten. Einflüsse aus der Temperatur und der Prüfkörperverformung sind zwar erkennbar, liegen aber in der Regel in einem akzeptablen Toleranzbereich von $\pm 5 \%$ der Ausgangslast.

nicht in einem gemeinsamen Durchgang erfolgen, zum Teil sehr deutliche Abweichungen. Die Unterschiede sind auch bei sonst gleicher Materialkombination und Belastung sichtbar. Das gilt sowohl für den nachgiebigen Silikonklebstoff Ottocoll S660 (Bild 129, $0,30 \text{ N/mm}^2$) als auch für den steiferen silanmodifizierten Klebstoff nolax C44.8505 (Bild 130, $1,20 \text{ N/mm}^2$ und $1,50 \text{ N/mm}^2$). Die Messkurven aus den zeitversetzten Versuchszyklen sind durch den Linientyp in den Diagrammen hervorgehoben. Das veränderte Kriechverhalten wird auf Schwankungen von Temperatur und Luftfeuchte zurückgeführt.²⁸² Es ist bekannt, dass stärkere Wärmebewegungen der Moleküle und nachlassender innerer Zusammenhalt bei vielen Klebstoffen zum Anwachsen plastischer Verformungsanteile bei höheren Temperaturen führen.²⁸³

Größere Verformungen entstehen in den Kriechversuchen, bei denen im Durchschnitt eine höhere Temperatur herrscht. Der Temperaturunterschied beträgt beispielsweise bei zwei Zeitstandversuchen, die unabhängig voneinander bei einer Spannung von $0,30 \text{ N/mm}^2$ ($35 \% R_{u,5}$) an Silikon durchgeführt werden, im Durchschnitt zwischen 3 und 4 K. Das gleiche gilt für nolax C44.8505 bei $1,50 \text{ N/mm}^2$ ($70 \% R_{u,5}$). Bei den zeitversetzten Versuchen mit $1,20 \text{ N/mm}^2$ ($55 \% R_{u,5}$) differiert die Durchschnittstemperatur sogar um 6 K.

Aufgrund der Versuchsergebnisse im Labormaßstab war bei nolax C44.8505 ein temperaturabhängiges Materialverhalten zu erwarten (Kapitel 5 und Kapitel 6). Der deutliche Einfluss, der sich hier bei den Kriechversuchen in Bauteilgröße zeigt, überrascht dann allerdings doch. Aus einer permanenten Schubbeanspruchung von $1,20 \text{ N/mm}^2$ ($55 \% R_{u,5}$) und einer Durchschnittstemperatur von $20,4^\circ\text{C}$ resultiert eine zeitabhängige Verformung von $\Delta x(t) \approx 1 \text{ mm}$. Dieser Wert stellt sich näherungsweise bei beiden Prüfkörpern ein. Die vier anderen Prüfkörper verformen sich in dem Kriechversuch,

²⁸² Die Hallentemperatur lässt sich nicht in engen Grenzen wie im Labor steuern und konnte daher über den Gesamtversuchszeitraum der Zeitstandversuche nicht konstant gehalten werden. Im Sommer traten kurzzeitig Spitzenwerte von fast $+30^\circ\text{C}$ auf. Im Winter fielen die Werte während der Betriebsruhe teilweise deutlich unter $+20^\circ\text{C}$. Die Durchschnittstemperatur, die über die Versuchsdauer von 1000 Stunden gebildet wurde, betrug bei den vier Versuchsdurchgängen minimal $+20,4^\circ\text{C}$ und maximal $+26,5^\circ\text{C}$.

²⁸³ Vergleiche Althof 1984, S. 143.

der etwa drei Monate zuvor bei einer um 6 K höheren Durchschnittstemperatur erfolgte, schon um $\Delta x(t) \approx 2 \text{ mm}$. Das entspricht einer Verdoppelung der Kriechverformungen, bei einem eher moderaten Temperaturunterschied.

Wegen seines ausgeprägt zeit- und temperaturabhängigen Verhaltens werden einige Zeitstandversuche an nolax C44.8505 über einen längeren Zeitraum fortgeführt. Das betrifft jeweils zwei Prüfkörper der Laststufen 3, 4 und 5. Diese Kurven sind in Bild 130 durch Pfeile gekennzeichnet. Zwei der drei Versuche starteten gleichzeitig.

7.3.4 Verlängerte Kriechversuche am Klebstoff mit mittlerer Steifigkeit

Ein Abklingen des Kriechprozesses, wie es sich bei den Versuchen bis 1000 Stunden bei nolax C44.8505 angedeutet hat, bestätigt sich bei den länger andauernden Zeitstandversuchen nicht. Stattdessen stellen sich weitere Verformungszuwächse ein (Bild 132). Erneute Anstiege und Kurvenabschnitte, in denen die Verformungen stagnieren, treten immer zum selben Zeitpunkt auf. Dieses Verhalten muss durch externe Einflüsse wie Temperatur oder Luftfeuchte hervorgerufen werden, da an den einzelnen Prüfständen die Belastung unabhängig voneinander aufgebracht wird. Bild 132 zeigt daher zusätzlich das Klima in der Halle und setzt dieses in Beziehung zu den auffälligen Kurvenbereichen.

Beim Zeitstandversuch, der mit $1,50 \text{ N/mm}^2$ (70 % $R_{u,5}$) am höchsten belastet ist, bildet sich ab etwa 3000 Stunden ein langes Plateau in der Messkurve aus. Das gleiche kann am Graphen des parallelen Versuchs mit einer Schubbeanspruchung von $0,70 \text{ N/mm}^2$ (35 % $R_{u,5}$) beobachtet werden. Die Klebschichtverformungen wachsen hier nicht weiter an und gehen zum Teil sogar geringfügig zurück. Dieses Zeitfenster fällt in die Heizperiode der Wintermonate, wo in der Halle etwa $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine relativ geringe Luftfeuchte von etwa 30 % herrschen. Im Frühjahr und Sommer nehmen die Temperaturen und die Luftfeuchte wieder zu. Mit der Erwärmung beginnen sich die Verformungen ab einem Zeitpunkt von etwas mehr als 7000 Stunden wieder zu vergrößern. Sowohl am Anfang als auch am Ende des horizontalen Kurvenabschnitts beträgt die Hallentemperatur annähernd $+22,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturen über diesem Schwellenwert scheinen den Kriechprozess zu beschleunigen.

Nach etwa 8300 Stunden versagt dann eine der Klebverbindungen, die mit $1,50 \text{ N/mm}^2$ belastet sind. Die obere Furnierholzlage reißt im Bereich der Klebfläche von der Koppel-
leiste ab. Das Bruchbild gleicht folglich dem aus den Kurzzeitversuchen. Durch den Schlag wird auch der zweite Prüfkörper zerstört, der sich auf der anderen Seite des Prüfrahmens befindet. Zum Zeitpunkt des Bruchs beträgt die mittlere Verformung aus beiden Prüfungen $\Delta x_m = 4,6 \text{ mm}$. Das entspricht einer Schubgleitung von etwa $\tan \gamma \approx 1,5$ und dem dreifachen Wert aus den Tragfähigkeitsversuchen. Das Fließverhalten des Klebstoffs ermöglicht folglich größere Klebschichtverzerrungen, wenn die Last langsam aufgebracht wird oder permanent wirkt.

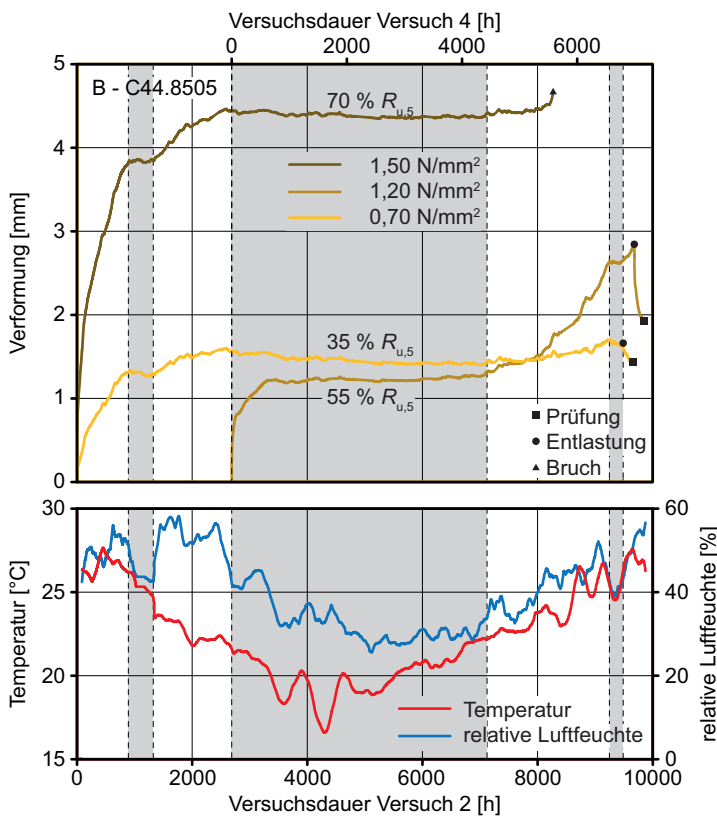


Bild 132

Kriechverformung und aufgezeichnete Raumklimadaten der Zeitstandversuche mit einer Dauer von mehr als 1000 Stunden bei nolaX C44.8505. Das Diagramm zeigt die Messergebnisse aus Versuchszyklus 2 und 4, die zeitversetzt gestartet worden sind. Die Differenz zwischen den beiden Versuchen beträgt etwas mehr als 2500 Stunden.

Temperatur und Luftfeuchte zeigen den 7-Tage-Durchschnitt der stündlich aufgezeichneten Klimadaten. Die Kurve wird dadurch geglättet und gibt langfristige Veränderungen der Umgebungsbedingungen an. Durch das Beheizen der Versuchshalle im Winter und die fehlende Klimatisierung im Sommer schwanken die Werte zum Teil deutlich.

Versuchsabschnitte mit stagnierenden Verformungswerten sind grau hinterlegt.

Die getroffenen Aussagen gelten – das Prüfkörperversagen ausgenommen – auch für die beiden anderen Kriechprüfungen. Anstiege und Plateaus bilden sich in identischen Versuchsphasen aus. Die Prüfkörper bleiben bis zum Entlasten nach 7000 Stunden ($1,20 \text{ N/mm}^2$) beziehungsweise nach

9500 Stunden ($0,70 \text{ N/mm}^2$) intakt. Allerdings ist der Kriechprozess bei diesen Versuchen keineswegs abgeklungen. Vielmehr deutet sich eine weitere Zunahme der Verformungen an, die im ungünstigsten Fall später zum Versagen geführt hätte. Nach einer einwöchigen Rückverformungsphase wird die Restfestigkeit der entlasteten Scherprüfkörper bestimmt.

Weitere Plateaus können bei etwa 1000 Stunden bei den zeitgleich gestarteten Kriechversuchen mit einer Dauerschubbeanspruchung von $1,50 \text{ N/mm}^2$ (70 % $R_{u,5}$) und $0,70 \text{ N/mm}^2$ (35 %) beobachtet werden. Dieses ist aber wesentlich kürzer als das zuvor beschriebene. In diesem Zeitraum sinkt die Temperatur kontinuierlich ab. Im Verlauf der Luftfeuchte bildet sich dagegen ein markantes Kurvenminimum aus. Die ab etwa 1300 Stunden folgende starke Zunahme der relativen Luftfeuchte von 43 auf 48 % korreliert mit dem Wiederaanwachsen der Kriechverformungen. Daraus wird geschlossen, dass auch die Luftfeuchte den Versuch beeinflusst. Ein ähnliches Phänomen tritt bei allen Prüfkörpern bei knapp über 9000 Stunden auf.

Die Temperatur- und Feuchteschwankungen können sich jedoch nicht nur auf das Kriechverhalten der Klebschicht auswirken, sondern auch auf die Materialfeuchte der Koppelste. Infolge einer Feuchteänderung quillt oder schwindet das Holz. Diese Formänderung kann die Messergebnisse beeinträchtigen.²⁸⁴

Die Detailaufnahme in Bild 120 zeigt die Messkonfiguration. Der Instrumentenhalter der Messuhr ist wenige Zentimeter über der Glaskante auf der Sperrholzste befestigt. Eine Längenänderung in diesem Teilabschnitt wird von der Messuhr ebenso erfasst, wie die eigentliche Klebschichtverformung. Feuchteschwankungen können daher das Messergebnis beeinträchtigen. Diese Störgröße wird daher im Zuge des später gestarteten vierten Kriechversuchs näher analysiert. Die Längenänderungsdifferenzen, die aus der

²⁸⁴ Kriechversuche an kleinen Prüfkörpern aus Holz und Glas, bei denen die Verformung auf ähnliche Weise gemessen wird, zeigen ebenso einen Einfluss von Quell- und Schwindverformungen. (Vergleiche Fadai 2015, S. 343.)

Holzfeuchte resultieren, werden parallel an einem unbelasteten Prüfkörper gemessen und anschließend von den Verformungen der belasteten Prüfkörper abgezogen. Da die Messung am Referenzprüfkörper nicht automatisch durchgeführt werden konnte, ist das Messintervall größer und etwas unregelmäßiger als bei den eigentlichen Verformungsmessungen. Bild 133 zeigt das Ergebnis für ein Zeitfenster des vierten Kriechversuchs.

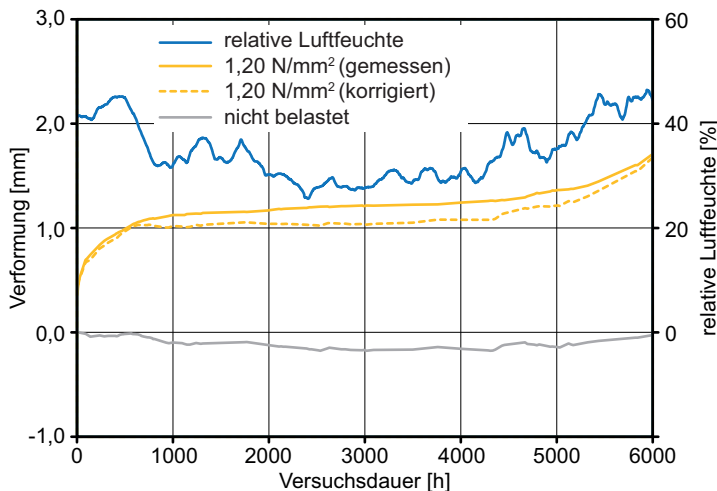


Bild 133

Korrektur der Quell- und Schwindeinflüsse durch Referenzmessung. Das Diagramm zeigt eine repräsentative Messung bei einer Belastung von $1,20 \text{ N/mm}^2$. Infolge des größeren Messintervalls ist die Kriechkurve gegenüber Bild 132 bereits leicht geglättet. Die Korrekturkurve weist einen plausiblen Verlauf auf. Der Einfluss der Längenänderung infolge von Quellen und Schwinden ist im Vergleich zur Klebschichtverformung gering.

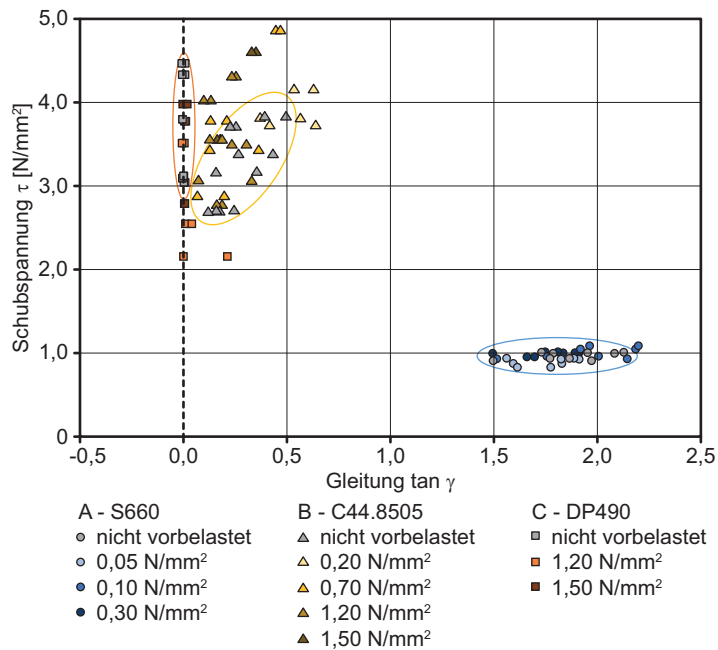
Die Koppelleiste aus Sperrholz verkürzt sich in der ersten Hälfte des Auswertezeitraums, da die Luftfeuchte und somit auch die davon abhängige Holzfeuchte abnehmen. Der Referenzgraph zeigt negative Werte. In der zweiten Hälfte steigt die Luftfeuchte wieder an und erreicht näherungsweise den gleichen Wert wie zu Beginn der Messung. Der unbelastete Prüfkörper kehrt hier ebenfalls in die Ursprungsposition zurück. Durch die Korrektur der direkten Messwerte kann der tatsächliche Verlauf der Verformungen hergeleitet werden. Die Differenz ist jedoch relativ gering. Obwohl sich im gezeigten Ausschnitt die mittlere Luftfeuchte um bis zu 20 % verändert, beträgt der Einfluss auf die Verformungsmessung stets weniger als 0,2 mm. Daraus folgt, dass Luftfeuchteschwankungen den Verlauf der Kriechkurve nur lokal begrenzt stören beziehungsweise diese nur in sehr geringem Umfang global verschieben können. Die in Bild 132 markierten kurzen Absätze im Kurvenverlauf korrelieren mit ausgeprägten Luftfeuchteminima. Das Schwinden der Koppelleiste beeinflusst den Verlauf der Kriechkurve daraufhin nur kurzfristig. Die Temperaturschwankungen sind deshalb bedeutsamer für die Interpretation der Ergebnisse.

7.3.5 Tragfähigkeit nach Vorbelastung

Nach dem Entlasten werden alle Scherprüfkörper analog zu den Versuchen in Abschnitt 7.3.1 bis zum vollständigen Versagen belastet. Die Schubspannung und die Gleitung, die bei Bruch der Klebung gemessen werden, sind in Bild 134 dargestellt. Die Mittelwerte und 5-Prozent-Quantilwerte können überdies Anhang C entnommen werden.

Bild 134

Bruchwerte der Klebverbindung bei Prüfung der vorbelasteten Scherprüfkörper. Die Zonen, in denen die Anfangsfestigkeit liegt, sind farbig markiert. Die Kennzeichnung entspricht Bild 126.



Die Vorbelastung durch den Zeitstandversuch wirkt sich bei allen Klebstoffen nur geringfügig auf die verbleibende Tragfähigkeit der langen Klebverbindung aus. Die Silikonprüfkörper erreichen unabhängig vom Lastniveau des Kriechversuchs mittlere Bruchspannungswerte von etwa 1,0 N/mm². Die Messergebnisse liegen in derselben Zone wie die nicht vorbelasteten Referenzprüfkörper. Beim zweiten Klebstoff nolax C44.8505 ist sogar ein leichter Anstieg der Bruchkräfte zu verzeichnen. Dafür könnte eine homogenere Spannungsverteilung in der Klebfuge verantwortlich sein, die sich infolge der plastischen Vorverformung des Klebstoffs im Kriechversuch einstellt. Bei den Prüfkörpern, die mit dem sehr steifen Klebstoff DP 490 geklebt wurden, deutet sich dagegen ein geringfügiger Festigkeitsverlust an. Aufgrund der geringen Probenanzahl, kann dieser allerdings auch von der Streuung der Holzbrüche hervorgerufen werden. Insgesamt betrachtet, bleibt der Einfluss der Vorbelastung gering.

8 Bewertung und Handlungsempfehlung

8.1 Alterungsverhalten

An dieser Stelle werden die Ergebnisse aus den Alterungsversuchen an den zwei höherfesten Klebstoffen (Kapitel 6) zusammengefasst und die Nutzungssicherheit der Klebverbindung auf der Grundlage von ETAG 002-1 und der ift-Richtlinie VE-08 beurteilt. Wie in Abschnitt 6.1.4 beschrieben, definieren diese beiden Richtlinien jeweils verschiedene Grenzen für einen zulässigen Festigkeitsverlust. Das Verhältnis von Restfestigkeit der gealterten Proben zu deren Anfangsfestigkeit ist in Bild 135 und Bild 136 für die Schubbeziehungsweise die Zugversuche dargestellt. Die 75-Prozent-Linie markiert die Anforderungen der ETAG 002-1, die 50-Prozent-Grenze die der ift-Richtlinie.

Der überwiegende Teil der Proben verliert in vertretbarem Maße an Festigkeit. Die Mittelwerte der Bruchspannungen nehmen in der Regel um weniger als 50 % ab. Hier erfüllen die Klebstoffe die Vorgaben der ift-Richtlinie. Die Grenzwerte der ETAG002-1 werden im Gegensatz dazu häufig nicht eingehalten. Bei je einem Alterungsszenario pro Klebstoff wird eine starke Schädigung beobachtet. Die Dauerhaftigkeit der beiden höherfesten Klebstoffe ist daher nicht mit der von Silikonem vergleichbar, die bisher für Holz-Glas-Verbundelemente eingesetzt wurden.²⁸⁵

Dabei fällt insbesondere die geringe UV-Beständigkeit von nolak C44.8505 auf, die als nicht ausreichend beurteilt wird. Das Bruchbild, die Festigkeit und das Verformungsvermögen zeigen deutliche Veränderungen nach der Lagerung unter Xenonlicht. Der Festigkeitsverlust, der infolge der Bestrahlung eintritt, offenbart sich vor allem beim Scherverversuch. Die Schubfestigkeiten liegen hier nur noch bei etwa 35 % des Ausgangsniveaus. Das Bruchmuster ändert sich. Die Klebung versagt auf der Glasseite durch oberflächennahen Kohäsionsbruch.

²⁸⁵ Neubauer (2011, S. 86 ff.) untersucht zwei Silikonklebstoffe nach einer Wasserlagerung. Die Festigkeit reduziert sich bei der Prüfung ohne Rücktrocknung um maximal 22 %. Eines dieser Silikone wurde auch bei Schober (2006, S. 36 und 2007, S. 20 ff.) Alterungstests unterzogen. Die Prüfkörper, die in Reinigungsmittel gelagert, bei erhöhter Temperatur geprüft und starker UV-Bestrahlung ausgesetzt wurden, erzielten eine Restfestigkeit von mehr als 75 % des Referenzwerts.

Bild 135

Festigkeitsverhältnis von gealterten zu nicht vorgeschädigten Scherprüfkörpern. Die Anfangsfestigkeit ist für jede Materialkombination angegeben.

Die prozentualen Restfestigkeiten beziehen sich bei Scotch-Weld DP 490 alle auf den Anfangswert der Glas-Vollholz-Kombination, da bei der Sperrholzvariante Glasbruch die Ergebnisse verfälscht.

Für die Kurzbezeichnungen der Alterungsszenarien siehe Bild 136.

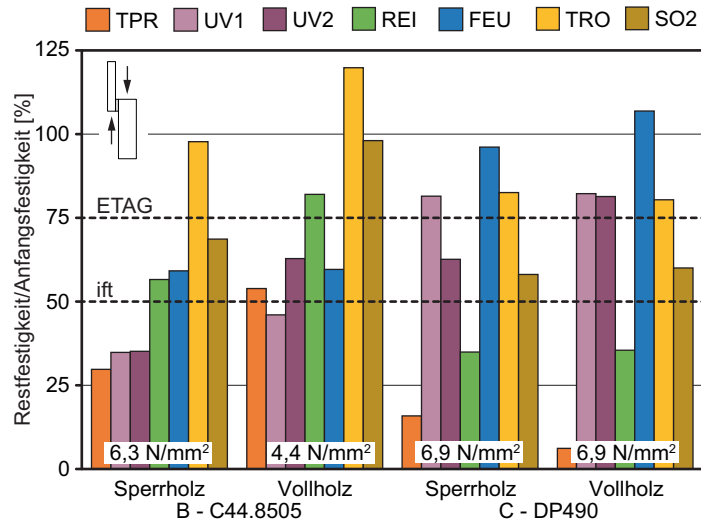
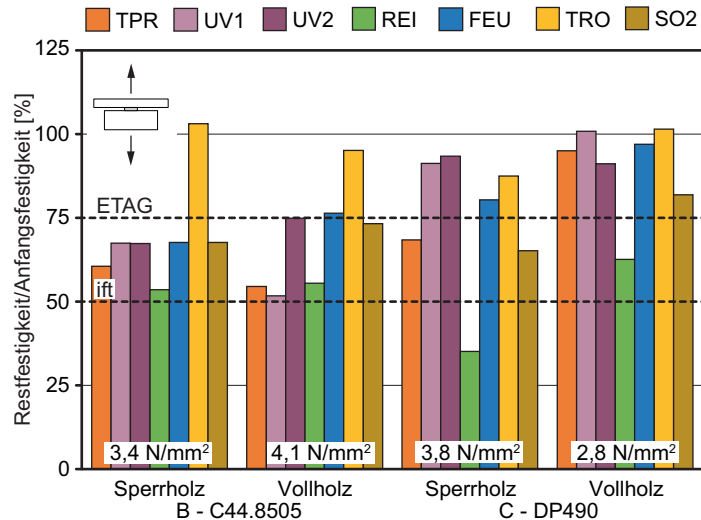


Bild 136

Festigkeitsverhältnis von gealterten zu nicht vorgeschädigten Zugprüfkörpern. Die Anfangsfestigkeit (100 %) ist für jede Materialkombination angegeben.

TPR Prüfung +80 °C
 UV1 Bestrahlung 500 h
 UV2 Bestrahlung 1000 h
 REI Reinigungsmittellagerung
 FEU Befeuchtung bei +20 °C | 90 % rF
 TRO Trocknung bei +20 °C | < 30 % rF
 SO2 Lagerung in SO2-haltiger Atmosphäre



Ähnlich geringe Werte werden bei Scotch-Weld DP 490 gemessen, wenn dieser nach der Lagerung im Reinigungsmittelbad getestet wird. Die prozentuale Restfestigkeit liegt hier nur noch bei 35 %. Eine Ausnahme bildet der Zugversuch an der Vollholz-Glas-Kombination, wo die Restfestigkeit 63 % beträgt. Auch bei dem steifen Epoxidharzklebstoff wirkt sich die kritische Degradation deutlich auf das Bruchbild aus. Die Klebverbindung versagt adhäsiv auf der Glasseite. In den anderen Fällen treten überwiegend Substratbrüche im Holz oder im Glas auf.

In Bezug auf die Temperaturstabilität weist nolax C44.8505 erkennbare Vorteile gegenüber Scotch-Weld DP 490 auf. In

drei von vier Fällen werden die Kriterien der ift-Richtlinie erfüllt. Die Festigkeitswerte sinken nicht unter die 50-Prozent-Grenze. Des Weiteren liegen die absoluten Festigkeitswerte des nachgiebigeren silanterminierten Klebstoffs über denen des sehr steifen Klebstoffs auf Epoxidharzbasis. Dieser erreicht bei einer Temperatur von +80 °C nur sehr geringe Festigkeiten. Das Haftvermögen auf Glas ist gestört.

Im Resultat kann festgestellt werden, dass beide höherfesten Klebstoffe die gestellten Anforderungen nicht vollständig erfüllen. Die Defizite treten klebstoffspezifisch in jeweils einer anderen Alterungsprüfung auf. In Betracht auf die baupraktische Anwendung müssen daher Zusatzmaßnahmen ergriffen werden, um die Klebstoffe ohne Einbußen an Tragsicherheit anwenden zu können. Dazu zählen beispielsweise redundante mechanische Haltesysteme oder das Abschirmen der kritischen Einflussgrößen. Die ganzheitliche Risikobewertung solcher Systeme in Kombination mit der steifen Klebung muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Dennoch erzielt nolax C44.8505 in Bezug auf seine Beständigkeit ein besseres Ergebnis als Scotch-Weld DP 490. Sämtliche Messergebnisse sind einschließlich der daraus ermittelten charakteristischen Festigkeiten in Anhang B zusammengefasst. Diese können für den Tragsicherheitsnachweis der Klebung herangezogen werden.

8.2 Korrelation der Ergebnisse aus Fügeteil- und Bauteilversuchen

8.2.1 Versuche bei kurzzeitiger Lasteinwirkung

Das Tragvermögen der Klebverbindung zwischen Holz und Glas erhöht sich durch die betrachteten höherfesten Klebstoffe gegenüber einer elastischen Verbindung mit Silikonklebstoff. Gleichzeitig reduziert sich die Relativverschiebung zwischen den beiden Fügepartnern spürbar. Bereits ein moderates Anheben der Klebstoffsteifigkeit mit dem Faktor Zehn führt zu einer deutlichen Verbesserung der Verbundwirkung. Diese Erkenntnis kann man durchgängig aus den Versuchsergebnissen ableiten, die in den Kapiteln 5 bis 7 ausführlich vorgestellt wurden. Tafel 15 stellt ausgewählte Kennwerte gegenüber. Die Prüfkörperdimensionen reichen dabei von reinen Materialproben bis hin zu großen Scherprüfkörpern mit Klebfugenlängen von einem Meter.

Tafel 15

Vergleichskennwerte aus Versuchen mit unterschiedlichen Prüfkörpern. Der Schubmodul G , die mittlere Bruchfestigkeit $\tau_{b,m}$ und das 5-Prozent-Quantil $R_{u,5}$ beziehen sich auf das Substratmaterial Sperrholz.

Prüfkörper- maßstab	Ottocoll® S660		nolax C44.8505		Scotch-Weld™ DP 490 ^a	
	G [N/mm²]	$\tau_{b,m}/R_{u,5}$ [N/mm²]	G [N/mm²]	$\tau_{b,m}/R_{u,5}$ [N/mm²]	G [N/mm²]	$\tau_{b,m}/R_{u,5}$ [N/mm²]
Schulterstab ISO 527-2	1,0 ^a	–	6,5 ^a	–	503,6 ^a	–
Kleiner Scher- prüfkörper REF	0,4 ^b	1,20/0,87	9,1 ^b	6,32/5,44	152,6 ^b	3,84/2,22
Großer Scher- prüfkörper	1,2 ^b	0,97/0,86	33,5 ^b	3,25/2,12	–	3,64/2,12

^a Schubmodul berechnet aus den Mittelwerten des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl (isotropes Material).

^b Schubmodul berechnet als Anstieg der Regressionsgerade im linearen Anfangsbereich eines repräsentativen Prüfkörpers.

Der 5-Prozent-Quantilwert und die mittlere Bruchfestigkeit des Referenzklebstoffs Ottocoll S660 zeigen nur eine geringe Abhängigkeit vom Maßstab der Klebverbindung. Gleichmaßen lässt sich in beiden Scherversuchen ein identisches Bruchverhalten beobachten. Die Festigkeiten, die aus der Prüfung von kleinen Zug- und Scherprüfkörpern hervorgehen, stellen daher belastbare Materialkenngrößen für den statischen Nachweis der Klebverbindung dar. Beim Schubmodul lassen sich etwas größere Abweichungen feststellen. In der Verbindung mit kleinen Fügeteilen verhält sich das Material am nachgiebigsten. Der Schubmodul, der aus der Längs- und Querdehnung am Schulterstab ermittelt wurde, eignet sich wiederum gut, um das Verformungsverhalten bei geringen Schubverzerrungen zu beschreiben.

Die in Tafel 15 gegenübergestellten Schubmodulwerte von nolax C44.8505 liegen auf dem Niveau der in Kapitel 4 identifizierten Steifigkeit von $G_{\tau} \approx 10 \text{ N/mm}^2$. Bereits bei diesem Wert erzielen die Holz-Glas-Verbundelemente eine gute Mitwirkung am Lastabtrag im Modellgebäude. Allerdings wirkt sich die Prüfkörpergröße deutlich auf die einzelnen Kennwerte aus. Der Schubmodul, der aus dem einaxialen Zugversuch hergeleitet wird, beträgt nur etwa eine Fünftel des Werts, der mithilfe des großen Scherprüfkörpers ermittelt werden konnte. Die labormaßstäbliche Scherverbindung ist ebenfalls deutlich nachgiebiger als die lange Klebfuge des großen Scherprüfkörpers. Im Gegensatz dazu werden die größten Schubfestigkeiten an den kleinen Proben gemessen. Das wird als ein Indiz dafür gewertet, dass Spannungsspitzen an den Klebschichträndern den Bruch auslösen. Mit

zunehmender Überlappungslänge wächst die Differenz dieser Spitzenwerte zur Mittelspannung. Mit der Versteifung der Klebschicht wird daraufhin der Bruch des Fügepartners Holz und nicht das Haftvermögen des Klebstoffs maßgebend.

Bei den großen Prüfkörpern, die mit Scotch-Weld DP 490 geklebt sind, versagt ebenfalls zuerst die Sperrholzleiste. Die charakteristische Festigkeit liegt mit $R_{u,5} = 2,1 \text{ N/mm}^2$ auf dem Niveau von nolax C44.8505. Die ähnlichen Werte weisen auf einen Zusammenhang zum Substratbruch hin. Die charakteristische Rollenschubfestigkeit der verwendeten Furniersperrholzleiste aus Birke beträgt parallel zur Faserichtung $f_{r,||} = 2,6 \text{ N/mm}^2$. Der Widerstand der Koppelleiste liegt damit über der mittleren Schubspannung, die bei Bruch auftritt.²⁸⁶ Allerdings wird das Sperrholz am oberen und unteren Ende der Klebschicht wesentlich stärker beansprucht, wo kritische Spannungen auftreten und den Bruch initiieren.

Aufgrund der zuvor beschriebenen Differenzen in den Kennwerten ist das Skalieren der Widerstandsgrößen aus den Versuchen im Labormaßstab nur begrenzt möglich. Bei Annahme einer gleichmäßigen Spannungsverteilung überschätzt man mit den Werten aus Kleinproben das Tragvermögen des geklebten Bauteils auf unzulässige Weise. Deshalb muss die Konstruktion entweder mithilfe von Bauteilversuchen oder einer aussagekräftigen numerischen Berechnung nachgewiesen werden. Diese erfordert eine möglichst genaue mathematische Beschreibung des Klebschichtverhaltens und der Fügebaumaterialien.

8.2.2 Versuche bei langandauernder Lasteinwirkung

Die Kriechversuche liefern eingehende Erkenntnisse zum Langzeitverhalten der drei untersuchten Klebstoffsysteme. Dabei führen die Kriechversuche an großen Prüfkörpern zu ähnlichen Erkenntnissen wie die Kriechversuche an den kleinen Zugscherproben. nolax C44.8505 weist hier ein ausgeprägtes Kriechverhalten auf. Der Abtrag ständiger Einwirkungen scheint unter diesen Gesichtspunkten nur für geringe Lastniveaus möglich. Die daraus resultierende irreversible Klebschichtverformung muss bei der baupraktischen Anwendung des Klebstoffs unbedingt berücksichtigt werden.

²⁸⁶ Vergleiche Finnforest 2001, S. 20.

Weiterhin beeinflussen bereits geringe Änderungen der Umgebungsbedingungen das Kriechverhalten. Prognosen über die tatsächliche Lebensdauer eines Elementes erfordern daher die Fortführung der Untersuchungen, die vor allem den Temperatureinfluss stärker beleuchten und längere Belastungsdauern einbeziehen. An ausgewählten Prüfkörpern sind bei Raumtemperatur erste Versuche mit längerer Versuchsdauer erfolgt. Bei der höchsten Laststufe brach einer der Prüfkörper nach etwas mehr als 8000 Stunden. Die Relativverschiebung zwischen Glas und Koppelleiste betrug zu diesem Zeitpunkt mehr als 4 mm. In diesem Verformungsbereich wird die Grenze des Verformungsvermögens der Klebschicht vermutet. Dieses Indiz muss durch weitere Zeitstandversuche untermauert werden.

Der betrachtete Referenzklebstoff auf Silikonbasis zeichnet sich dagegen durch ein hohes elastisches Verformungsvermögen und moderate Kriechverformungen aus. Bei vergleichbaren Lastniveaus ist die Summe der Verformungen aus elastischen und zeitabhängigen viskoelastischen Anteilen nach 1000 Stunden dennoch größer als bei nolax C44.8505. In beiden Fällen kann keine Verminderung der Tragfähigkeit durch das Vorbelasten im Kriechversuch festgestellt werden. Der sehr steife Klebstoff Scotch-Weld DP 490 zeigte im Kriechversuch keine signifikanten Verformungen und ist damit für den Dauerlastabtrag geeignet.

Bei dem Vergleich der Kriechkurven der kleinen mit denen der großen Prüfkörper bestätigen sich die Beobachtungen aus den Versuchen unter kurzer Lasteinwirkungsdauer. Beispielshaft werden dazu die Kriechkurven von Ottocoll S660 und nolax C44.8505 für die Lastniveaus 10% und 35 % $R_{u,5}$ in Bild 137 und Bild 138 miteinander verglichen. Die Kriechkurven des Silikonklebstoffs weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Die Mittelwertkurve der Versuche an dicken Zugscherproben steigt näherungsweise parallel zu der repräsentativ dargestellten Messung aus dem Bauteilversuch an. Die wellenförmige Störung der Bauteilgraphen resultiert aus dem Quellen und Schwinden der Koppelleiste. Allerdings unterscheidet sich die Anfangsverformung der Prüfkörper. Die kleinen Prüfkörper sind etwas nachgiebiger. Diese Beobachtung korreliert mit den Schubmodulangaben in Tafel 15.

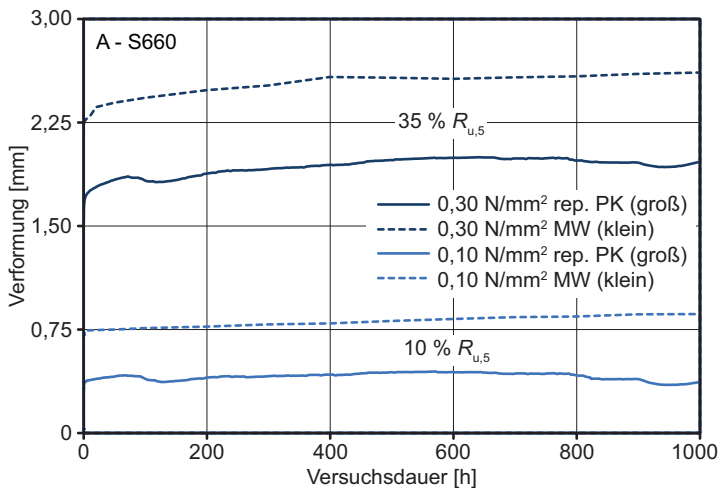


Bild 137

Vergleich der Kriechkurven aus Versuchen im Bauteil- und im Labormaßstab für Ottocoll S660.

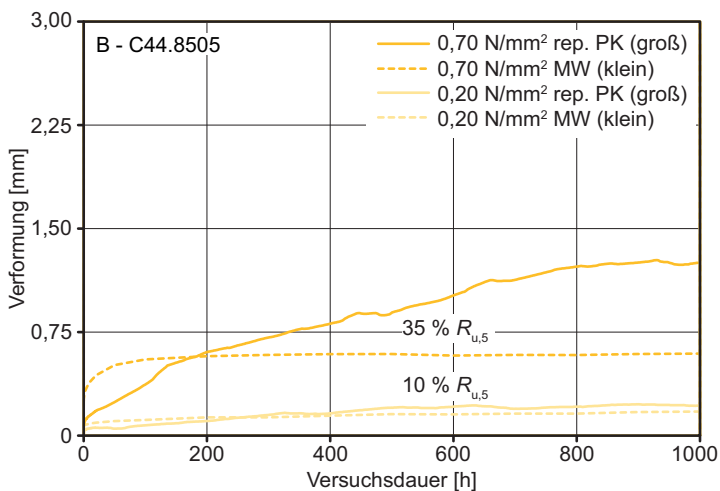


Bild 138

Vergleich der Kriechkurven aus Versuchen im Bauteil- und im Labormaßstab für nolax C44.8505.

Bei nolax C44.8505 sind die Anfangsverformungen der langen Klebfugen wesentlich geringer. Hier bestätigt sich erneut der Zusammenhang zu den Steifigkeiten, die unter Kurzzeitbelastung ermittelt wurden. Aufgrund des Temperaturanstiegs in der Halle nehmen die Verformungen am großen Prüfkörper aber stärker zu als an der kleinen Zugscherprobe, die bei einer konstanten Temperatur geprüft werden konnte. Der Vergleich ist daher nur wenig aussagekräftig. Dennoch scheinen zeitversetzt Fließverformungen in der langen Klebschicht aufzutreten. Die Verschiebung der langen Klebungen nähert sich an die der kleinen Prüfkörper nach einer bestimmten Belastungsdauer an und überschreitet diese sogar.

8.3 Der Vorzugsklebstoff und seine Einsatzgrenzen

Aus dem in dieser Arbeit geprüften Spektrum der höherfesten Klebstoffe wird nolax C44.8505 als Vorzugsklebstoff für den Einsatz in aussteifenden Holz-Glas-Verbundelementen vorgeschlagen. Trotz seiner Defizite in Bezug auf die UV-Beständigkeit schneidet der Klebstoff bei den Alterungsuntersuchungen besser ab als Scotch-Weld DP 490.

Klebschichten aus diesem silanterminierten Polymer verfügen bei Raumtemperatur über eine ausreichend hohe Steifigkeit, um in einem Aussteifungssystem einen maßgeblichen Lastanteil zu übernehmen. Gleichzeitig überzeugt die verbleibende Verformungsfähigkeit des Materials, die auch bei einer tiefen Temperatur nicht außerordentlich abnimmt. Im Scherversuch an kleinen Proben kann ein bilinearer Verlauf der Kraft-Verformungs-Beziehung abgelesen werden. In Bezug auf den Ausgleich von Längenänderungsdifferenzen zwischen den unterschiedlichen Fügepartnern ist das von Vorteil. Bei hohen Temperaturen lagen die Schubfestigkeiten über denen des steiferen Scotch-Weld DP 490.

Andererseits resultieren aus diesem Materialverhalten auch Hemmnisse für die Anwendung als Tragelement. Das Kriechverhalten des Klebstoffs ist sehr ausgeprägt und zeigt eine signifikante Abhängigkeit von der Temperatur. Langandauernde Belastungen, die infolge von ständigen Lastanteilen in einem Aussteifungssystem auftreten, führen unvermeidlich zu einer zeitabhängigen Zunahme der Verformungen am oberen Riegel des Verbundelements. Das Bauteil entzieht sich dadurch der Belastung. Ein Aussteifungssystem für mehrgeschossige Gebäude, das ausschließlich auf der Tragwirkung von Holz-Glas-Verbundelementen mit diesem Klebstoff beruht, ist daher nicht dauerhaft tragfähig beziehungsweise gebrauchstauglich. In Kombination mit konventionellen Aussteifungselementen wie beispielsweise einem massiven Kern oder einzelnen Wandscheiben ließe sich das Tragvermögen der Holz-Glas-Verbundelemente dennoch nutzen. Ständige Lasten lagern sich als Folge der Kriechverformungen nach einiger Zeit auf das Teilsystem aus konventionellen Bauteilen um. Unter kurzzeitig einwirkenden Beanspruchungen, die den größeren Anteil der Horizontalkräfte auf ein Gebäude repräsentieren, profitiert das Tragwerk von der Steifigkeit, die die Holz-Glas-Verbund-Fassade bereitstellt.

Der Anspruch an das zuvor hervorgehobene Ausgleichsvermögen soll anhand eines einfachen Berechnungsbeispiels zu Längenänderungsdifferenzen der Verbundmaterialien verdeutlicht werden. Hierzu werden die Verfahrensweise und die Annahmen der Arbeiten von Hochhauser (2011) und Neubauer (2008) aufgegriffen. Die Berechnung erfolgt für ein Element mit den Abmessungen von 2,00 x 3,00 m, wie es bereits in Kapitel 4 untersucht wurde.

Die thermische Dehnungsdifferenz ist aufgrund des ähnlichen Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Sperrholz gering. Der Berechnung wird eine Temperaturänderung von 40 K zugrunde gelegt. Die Differenz wirkt sich je zur Hälfte auf beide Enden der längeren, vertikalen Klebfuge aus.

$$\begin{aligned}\Delta l_{\text{Temp}} &= (\alpha_{\text{T,Glas}} - \alpha_{\text{T,BFU}}) \cdot \Delta T \cdot h / 2 \\ &= (9,0 - 4,2) \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 3000 / 2 = 0,3 \text{ mm}\end{aligned}$$

Gleichung 20

Die feuchteinduzierte Längenänderung der Koppelleiste ergibt sich mit dem in Tafel 4 angegebenen differentiellen Schwindmaß s und einer angenommenen Feuchteänderung im Sperrholz von $\Delta u = 6 \%$ zu:²⁸⁷

$$\Delta l_{\text{F}} = s \cdot \frac{\Delta u}{100 \%} \cdot h / 2 = 0,020 \cdot \frac{6}{100} \cdot 3000 / 2 = 1,8 \text{ mm}$$

Gleichung 21

Die Schraubverbindung zwischen Koppelleiste und Unterkonstruktion behindert teilweise eine freie Längenänderung. Die Summe beider Verformungsanteile wird daher auf 25 % abgemindert:²⁸⁸

$$\Delta l_{\text{ges}} = (0,3 + 1,8) \cdot 0,25 = 0,5 \text{ mm}$$

Gleichung 22

²⁸⁷ Eine Feuchteänderung von 6 % wird u. a. bei einem ähnlichen Berechnungsbeispiel (Neubauer 2008, S. 187) angesetzt. Die Werte entsprechen annähernd den Auswirkungen, die sich in den Holzfeuchtwechsels bei +20 °C nach ift-Richtlinie VE-08/2, Tab. 1 ergeben (Bild 87 und Tafel 9).

²⁸⁸ Das Abmindern des Zwangs geht auf eine numerische Untersuchung bei Neubauer (2008, S. 151 und S. 189) zurück. Diese gilt aber nur für eine bestimmte Geometrie der Koppelleiste und ein festgelegtes Schraubenbild. Der Wert wird hier exemplarisch übernommen. Für eine korrekte Bestimmung dieses Faktors vergleiche Hochhauser 2011, S. 119 ff.

Eine solche Differenz kann der steife Klebstoff Scotch-Weld DP 490 nicht kompensieren. Das zeigen die Schubversuche an diesem Material. In diesem Fall treten sehr hohe Beanspruchungen in den Fügeteilen und der Klebschicht auf. Im Gegensatz dazu erlaubt das viskoelastische Verhalten von nolax C44.8505 ein Relaxieren der Klebschicht, wenn wie bei einer feuchtebedingten Formänderung die Beanspruchung langsam gesteigert wird. Im Kriechversuch konnte die Klebschicht Verschiebungen von mehr als 4 mm ertragen, bevor sie versagte.

Zur weiteren Definition des Einsatzbereichs wird die Tragfähigkeit eines Holz-Glas-Verbundelements basierend auf der Schubfeldtheorie (Abschnitt 4.2.3) abgeschätzt. Es wird angenommen, dass das Element nur veränderliche Lasten überträgt. Die Ausgangsbasis bildet wie zuvor ein Element mit einer Größe von 2,00 x 3,00 m.²⁸⁹ Bei der Berechnung werden die charakteristische Bruchfestigkeit aus den Versuchen an großen Scherprüfkörpern und der Sicherheitsbeiwert γ_{tot} nach ETAG 002-1 herangezogen.²⁹⁰

Gleichung 23

$$F_{h,d} = \frac{R_{u,5}}{\gamma_{\text{tot}}} \cdot l_{\text{ü}} \cdot b$$

$$= \frac{2,1 \text{ N/mm}^2}{6,0} \cdot 1904 \text{ mm} \cdot 12 \text{ mm} \approx 8,0 \text{ kN}$$

Dieser zulässigen Horizontallast wird die charakteristische Einwirkung gegenübergestellt. Der Anschaulichkeit halber wird die Lastverteilung am Modellgebäude (Kapitel 4) für einen Schubmodul der Klebung von $G_{\tau} = 10 \text{ N/mm}^2$ genutzt. Aus Bild 52 ergibt sich daraufhin ein Lastanteil von 20,7 % der auf zwei Elemente der Fassade wirkt.

Der veränderliche Anteil der Horizontalkraft beträgt etwa 162 kN für die viergeschossige und 59 kN für die zweigeschossige Variante und wirkt auf die Decke über dem Erdgeschoss (Bild 45).

²⁸⁹ Für weitere Geometrieangaben siehe Tafel 3.

²⁹⁰ Die charakteristische Bruchspannung der bauteilähnlichen Klebverbindung beträgt $R_{u,5} = 2,1 \text{ N/mm}^2$. In den kleinen Scherversuchen werden mit Ausnahme der UV-Lagerung und der Prüfung bei +80 °C höhere charakteristische Festigkeiten erreicht (siehe Anhang B).

Die horizontale Belastung am Kopf eines Elements beträgt:

$$F_{h,4G} = \frac{0,207}{2} \cdot 162 \text{ kN} = 16,8 \text{ kN}$$

Gleichung 24

$$F_{h,2G} = \frac{0,207}{2} \cdot 59 \text{ kN} = 6,1 \text{ kN}$$

Gleichung 25

Die Vordimensionierung am Modellgebäude zeigt, dass ein mit nolax C44.8505 geklebtes Holz-Glas-Verbundelement mindestens für ein zweigeschossiges Gebäude, bei entsprechender Verdopplung der Klebfugenbreite auch für ein viergeschossiges Gebäude nutzbar wäre.²⁹¹

8.4 Konstruktion

Die tragende Glasschicht des Holz-Glas-Verbundelements muss aus einem Verbund-Sicherheitsglas bestehen. Da raumhohe Glasfassaden in mehrgeschossigen Gebäuden in der Regel auch eine absturzsichernde Funktion erfüllen, muss sich diese Verglasung aus grob brechenden Glasarten zusammensetzen. Zum Schutz vor UV-Strahlung sollte die Innenseite des tragenden Glases im Bereich der Klebfuge keramisch beschichtet sein. Die erfordert einen thermischen Prozess, sodass für diese Glasschicht nur teilvorgespanntes Glas verwendet werden kann.

Der außen liegende Teil des Glasaufbaus kann frei gewählt werden. Heute zählen Dreischeiben-Isolierverglasungen zum Standard. Das Randverbundsystem muss dabei den Anforderungen an einen Structural-Sealant-Glazing-Bausatz genügen, da die Windlasten von der Sekundärdichtung abgetragen werden. Die Dichtstoffe benötigen daher eine Zulassung für diesen Anwendungszweck. Das Eigengewicht der Scheiben muss über ein Konsollager (Bild 139) gehalten werden. Ab einer Einbauhöhe von acht Metern werden darüber hinaus mechanische Zusatzhalter (Bild 140) erforderlich. Die gezeigten Prinziplösungen gehen auf ein bekanntes Fassadensystem der Firma UNIGLAS (2014) zurück.

²⁹¹ Bei der Vordimensionierung bleiben die weiteren Nachweise wie beispielsweise die der Verglasung, der Koppelleiste oder der Verschraubung unberücksichtigt. Der Grenzwert der Kopfverschiebung von $h/500 = 6 \text{ mm}$ wird bei dieser Belastung eingehalten (Bild 46).

Bild 139

Ansicht und Vertikalschnitt des Klebfugendetails. Prinzip des Auflagers zum Eigengewichtsabtrag nach UNIGLAS (2014, S. 44).

- 1 Verglasung
- 2 Koppelleiste
- 3 Riegel der Unterkonstruktion aus Holz
- 4 Klebverbindung
- 5 Edelstahlbolzen
- 6 Verglasungsaufleger aus Kunststoff

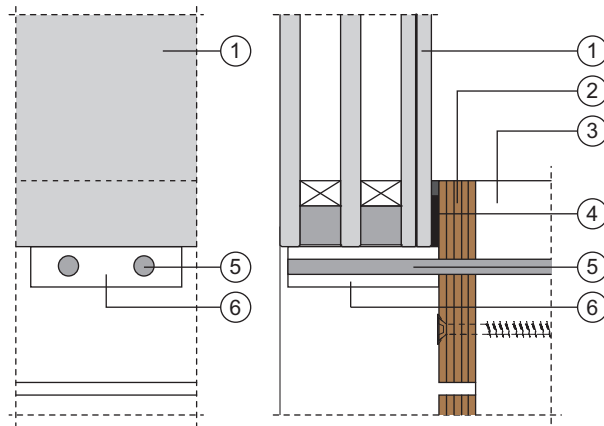
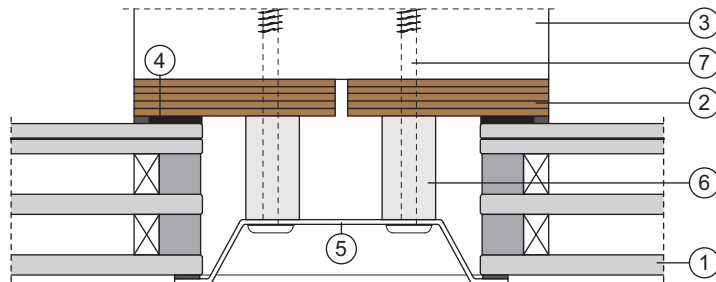


Bild 140

Horizontalschnitt. Prinzip der mechanischen Sicherung.

- 1 Verglasung
- 2 Koppelleiste
- 3 Pfosten
- 4 Klebverbindung
- 5 Halter
- 6 Kunststoffhülse
- 7 Holzschraube



Die dargestellten Halter könnten im Zuge einer Risikoanalyse, die für die baupraktische Anwendung von aussteifenden Holz-Glas-Verbundelementen erforderlich wird, als Kompensationsmaßnahmen für die nachteiligen Klebstoffeigenschaften neu bewertet werden. In die Zustimmung für ein solches Projekt sollten ebenso Aspekte der Qualitätssicherung beim Kleben einfließen, da für den Vorzugsklebstoff noch keine Anwendungsregeln existieren.

Nicht zuletzt bedarf es konstruktiver Lösungen für die Fuge zwischen zwei tragenden Fassadenelementen. Bild 140 zeigt diese Schnittstelle. Aufgrund der größeren Traglasten muss die Koppelleiste stärker dimensioniert werden als bei einem reinen Pfosten-Riegel-System. Es entsteht ein relativ großer Spalt zwischen den Verglasungen. Erste Konzepte für dieses Detail wurden für einen Experimentalbau entwickelt und umgesetzt.²⁹² Das Bauwerk dient als Feldstudie zur erstmaligen Anwendung des hier gewählten Vorzugsklebstoffs.

²⁹² Vergleiche Nicklisch 2015b, S. 377 ff.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, die Anwendbarkeit von höherfesten Klebstoffen bei neuartigen Verbundbauteilen aus Holz und Glas eingehend zu untersuchen und daraus Empfehlungen für eine zukünftige baupraktische Anwendung abzuleiten. Das Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf die Untersuchung der lastabtragenden Klebverbindung, die eine ausschlaggebende Schnittstelle zwischen den beiden doch sehr gegensätzlichen Verbundpartnern darstellt. Die Qualität dieser Verbindung entscheidet maßgeblich über die Eigenschaften und das Leistungsvermögen des Verbundbauteils. Aspekte der Alterungsbeständigkeit und des zeitabhängigen Materialverhaltens unter langandauernder mechanischer Beanspruchung bilden daher den Kern der experimentell geprägten Studien.

Mit der zunehmenden Wertschätzung von Energieeffizienz und Nachhaltigkeit rücken nachwachsende Rohstoffe verstärkt in den Fokus des gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Interesses. Holz und Holzwerkstoffe gewinnen als Baumaterialien wieder unverkennbar an Bedeutung und werden auch bei Großbauvorhaben vermehrt nachgefragt. Verbundkonstruktionen aus Holz und Glas ermöglichen es, diesem Bedarf im Fassadenbau nachzukommen.

Die wesentliche Motivation, Holz und Glas durch eine tragende Klebung zu verbinden, besteht in dem vielfach ungenutzten Tragvermögen, das eine Verglasung in ihrer Scheibenebene aufweist. Gelingt es, die Kräfte gleichmäßig verteilt vom Holz auf das Glas zu übertragen, kann dieses Potenzial ausgeschöpft werden. Holz-Glas-Verbundträger oder aussteifende Fassadenelemente mit umlaufender, lastabtragender Holz-Glas-Verklebung sind nur zwei Beispiele dafür, wie diese Idee konstruktiv umgesetzt werden kann.

Im Fokus dieser Arbeit stehen Verbundelemente für die Fassade, die als Schubfeld zum Aussteifen des Tragsystems beitragen können. Zu Beginn wird der Forschungsstand zu der noch relativ jungen Holz-Glas-Verbundtechnologie ausführlich dargelegt. Der Blick richtet sich dabei nicht nur auf den Bauteiltypus des aussteifenden Wandelements, sondern auch auf verwandte Lösungen, deren Konstruktionsweise

und Klebfugengestaltung für solche Fassadenelemente relevant sind. In der Vergangenheit wurden vor allem prototypische Bauteilvarianten zu Schubfeldern, Platten und Trägern entwickelt und unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Die darauf aufbauenden und in dieser Arbeit erstmals herausgearbeiteten Übersichten zu bekannten Konstruktionsformen im Holz-Glas-Verbund zeigen vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten für das Klebfugendetail.

Durchgesetzt haben sich Systeme, bei denen die Verglasung außen liegt und die Holzprofile somit vor direkten Witterungseinflüssen geschützt sind. Weiterhin überzeugt das Konzept der Koppelleiste, einem zusätzlichen Adapter aus Furniersperrholz, auf den die Verglasung schon im Werk aufgeklebt wird. Die Leiste bildet einen Rahmen um das Glas und wird vor Ort mit der Holzunterkonstruktion verschraubt. Sie ermöglicht einen hohen Vorfertigungsgrad und einen problemlosen Austausch von beschädigten Elementen. Eine umfassende Recherche, die auch Verbundlösungen von Glas mit anderen Materialien beleuchtet, bestätigt zudem, dass die große Nachgiebigkeit und die vergleichsweise geringe Festigkeit der bisher häufig angewendeten Silikonklebstoffe das mögliche Anwendungsspektrum auf ein niedriges Lastniveau und somit auf zweigeschossige Gebäude limitiert. Es wird daher nach konstruktiven und materialseitigen Alternativlösungen gesucht, um diese Grenzen zu überwinden. Diese Arbeit knüpft hier mit der eingehenden Untersuchung von höherfesten Klebstoffen an, die aufgrund ihrer Steifigkeit die Tragwirkung verbessern.

Tragende Klebverbindungen zwischen Holz und Glas zählen zu den unregulierten Bauarten, für die in Deutschland eine Zustimmung im Einzelfall oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung beantragt werden muss. Die Klebstoffe selbst sind in keiner Norm erfasst und somit ebenfalls nicht geregelt. Das Untersuchungsprogramm dieser Arbeit wird deshalb unter der Prämisse gestaltet, dass es sich an üblichen Zulassungsverfahren und Eignungsprüfungen im Glas- und Fassadenbau orientiert. Hierfür ist eine intensive Analyse der baurechtlichen Rahmenbedingungen und des Entwicklungsstandes in Bezug auf das Kleben im Glasbau unabdingbar. Innovative Beispielprojekte zeigen intelligente Detaillösungen zu lastabtragenden Klebungen, die weit außerhalb des bekannten Anwendungsspektrums des Structural Sealant Glazings liegen. Für diese Anwendungen existieren

noch keine Richtlinien. Auch beim Bauen mit Holz-Glas-Verbundelementen stößt man in ein solches normenbezogenes Vakuum vor. Deshalb wird eine geeignete Verfahrensweise zur Umsetzung von geklebten Glaskonstruktionen in den Grundzügen skizziert. Anhand dessen wird zusätzlich zur wissenschaftlichen Interpretation eine praxisnahe Bewertung der Versuchsergebnisse möglich, was ein Alleinstellungsmerkmal dieser Arbeit darstellt.

Das Verformungsvermögen des Klebstoffs spielt eine zentrale Rolle bei der Materialauswahl und Gestaltung eines Verbundbauteils. Es ist daher zunächst notwendig, den Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf das Tragverhalten eines Holz-Glas-Verbundelements und dessen Zusammenspiel mit den anderen Bauteilen in einem komplexen Tragwerk zu ergründen. Dazu wird an einem exemplarischen Bauwerk eine Parameterstudie durchgeführt, bei der die Verteilung der Horizontallasten auf die vertikalen Aussteifungselemente der Konstruktion in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Verbundfuge zwischen Holz und Glas untersucht werden. Hierbei werden bekannte analytische Berechnungsverfahren auf Basis von Federmodellen genutzt.

Für das betrachtete Modellgebäude nimmt der Lastanteil, der auf die Holz-Glas-Verbundelemente in der Fassade entfällt, bis zu einem Schubmodul von etwa 10 N/mm^2 stetig zu. Mit deutlich steiferen Klebstoffen können nur noch marginale Zuwächse erreicht werden. Auf Basis dieses Ergebnisses werden drei Steifigkeitsbereiche definiert, die bei der Klebstoffwahl von Bedeutung sind. Der erste Bereich umfasst sehr nachgiebige Systeme. Die entsprechenden Holz-Glas-Verbundelemente beteiligen sich bezogen auf ihre Wandlänge nur in geringem Maße am Lastabtrag. Die zweite Gruppe markiert dann den identifizierten Steifigkeitsbereich zwischen einer geringen und hohen Mitwirkung im Aussteifungssystem. Hier kann gezeigt werden, dass bereits eine moderate Steifigkeitserhöhung ausreicht, um eine mit Massivholzwänden vergleichbare Systemsteifigkeit der Holz-Glas-Verbundelemente zu erreichen. Bei Klebstoffen aus der dritten Gruppe profitiert das Gesamtsystem nicht mehr von der Erhöhung der Steifigkeit in der Klebfuge, da die Nachgiebigkeit anderer Schnittstellen des Tragsystems, wie die der Verbindungsmittel zwischen Decke und Wand, das Verhalten dominieren.

Die Klebstoffvorauswahl für die experimentellen Untersuchungen stützt sich auf diese Definition. Zusätzlich fließen weitere Kriterien bei der Entscheidung ein. Diese lassen sich aus der Verglasungs- und Fugengeometrie, dem Klebprozess und der Anwendung in der Fassade herleiten. Sieben Klebstoffe, die eine große Bandbreite von Materialeigenschaften abdecken, werden daraufhin ausgewählt. Jeweils drei davon werden in die Gruppe mit mittlerer beziehungsweise in die Gruppe mit hoher Steifigkeit eingeordnet. Der verbleibende Klebstoff, ein nachgiebiger Silikonklebstoff, der bereits in Pilotprojekten zum Holz-Glas-Verbund eingesetzt wurde, dient als Referenzklebstoff für den Vergleich mit der bisherigen Anwendungspraxis.

Die Klebstoffe durchlaufen ein sehr umfangreiches Untersuchungsprogramm. Dabei können die grundlegenden Materialeigenschaften und das Haftverhalten auf Sperrholz, dem Material der Koppelleiste, bestimmt werden. Die Charakterisierungsmethoden umfassen die thermische Analyse des Grundmaterials, Zugversuche an Schulterstäben und Scherversuche an labormaßstäblichen Klebungen. Hieraus resultieren aussagekräftige Materialkennwerte, anhand derer das Klebstoffspektrum für die zeitlich sehr aufwendigen Alterungs- und Kriechversuche weiter eingegrenzt wird. Aus jeder Gruppe geht der potenziell geeignetste Klebstoff für eine tiefgründige Untersuchung in den Hauptversuchen hervor. Der nachgiebigere, silanterminierte Epoxidharzklebstoff nolax C44.8505 und der sehr steife Epoxidharzklebstoff Scotch-Weld DP 490 werden aus den Klebstoffgruppen mit mittlerer Steifigkeit beziehungsweise hoher Steifigkeit ausgewählt. Der Silikonklebstoff Ottocoll S660 ist als Referenzmaterial weiterhin Teil der Auswahl.

Diese Klebstoffe werden anschließend einer weiteren, wesentlich intensiveren experimentellen Überprüfung unterzogen. Das Versuchsprogramm dieser Hauptversuche setzt sich sowohl aus standardisierten Prüfmethoden als auch aus neuen, eigens im Zuge der Arbeit entwickelten Verfahren zusammen. Die Versuche unterscheiden sich vor allem in Bezug auf den Betrachtungsmaßstab der Klebfuge. Der eine Teil erfolgt an Scher- und Zugprüfkörpern, bei denen kleine Fügeteile aus Glas und zwei unterschiedliche Holzarten miteinander verklebt sind. An mehr als 600 Proben werden die Beständigkeit und das Kriechverhalten der Klebstoffe analy-

siert. Der andere Teil widmet sich der Analyse bauteilähnlicher Klebfugen, bei denen die Klebschichtgeometrie und die Beanspruchung des Prüfkörpers, der eines realen Bauteils nachempfunden sind. Der Prüfkörper besteht aus einer 500 x 1000 mm großen Verglasung an deren Längskanten eine Adapterleiste aus Sperrholz geklebt ist. Hieran werden Tragfähigkeitsprüfungen und Zeitstandversuche unter Schubbelastung durchgeführt.

Mit den gewählten höherfesten Klebstoffen kann die charakteristische Festigkeit der nicht gealterten Klebschichten im Vergleich zu dem nachgiebigen Referenzklebstoff auf Basis von Silikon mehr als verdoppelt werden. Die Verformungen reduzieren sich in noch größerem Maße. Damit wird ein wesentliches Ziel dieser Arbeit erreicht. Darüber hinaus zeigt sich dann bei den bauteilähnlichen Versuchen mit kurzer Lasteinwirkungsdauer, dass mit der Versteifung der Klebverbindung durch höherfeste Klebstoffe der Bruch des Fügepartners Holz zum maßgebenden Versagenskriterium wird. Mit den hier betrachteten höherfesten Klebstoffen lässt sich folglich eine sehr gute Haftung auf dem betrachteten Furniersperrholz aus Birke erzielen.

Aus dieser Beobachtung leitet sich eine weitere ausschlaggebende Erkenntnis ab. Die Festigkeit der Klebverbindung kann nicht in gleichem Maße gesteigert werden, wie die Steifigkeit der Klebschicht. Im direkten Vergleich der beiden Klebstoffe mit mittlerer und hoher Steifigkeit, schneidet deshalb nolas C44.8505 besser ab. Seine größere Nachgiebigkeit und sein bilineares Materialverhalten im Scherversuch, das von viskosen Verformungsanteilen zeugt, erscheinen grundsätzlich geeigneter, um Zwang aus unterschiedlichen Längenänderungen der Verbundpartner zu kompensieren. Das Verformungsvermögen von Scotch-Weld DP 490 ist dagegen stark begrenzt. Die starre Klebung führte in den Versuchen zu zahlreichen Glasbrüchen.

Bei den labormaßstäblichen Prüfungen zur Beständigkeit werden die Klebstoffproben für einen längeren Zeitraum starker UV-Strahlung ausgesetzt, in korrosiver Umgebung oder einem Bad aus Reinigungsmittellösung gelagert sowie in Klimakammern bei Raumtemperatur befeuchtet oder getrocknet. Bei der Mehrzahl der untersuchten Proben sind die Ergebnisse vielversprechend. Der Festigkeitsverlust, der sich durch die Alterung der Klebschicht einstellt, liegt hier in

einem für den baupraktischen Einsatz akzeptablen Bereich. Es werden jedoch auch kritische Einwirkungen identifiziert, die das Klebschichtverhalten signifikant beeinträchtigen. Die UV-Bestrahlung stellt sich als ungünstigste Beanspruchung für den Klebstoff mit mittlerer Steifigkeit (nolax C44.8505) heraus. Für den Klebstoff mit hoher Steifigkeit (Scotch-Weld DP 490) ist die Lagerung in Reinigungsmittellösung schädlich. In beiden Fällen sinkt die mittlere Festigkeit nach der Alterung um mehr als 50 % und liegt damit unter den zulässigen Grenzwerten der ift-Richtlinie VE-08 für geklebte Verglasungssysteme. Eine Verwendung kann nur mit konstruktiven Kompensationsmaßnahmen oder durch Abschirmen der kritischen Einwirkungsgrößen empfohlen werden. Entsprechende Vorschläge werden bei der abschließenden Bewertung der Ergebnisse unterbreitet.

Zeitstandversuche mit einer Dauer von 1000 Stunden bilden eine weitere wichtige Säule bei der Klebstoffbeurteilung. Insbesondere an großen Scherprüfkörpern mit realitätsnaher Klebfugengeometrie waren in der Vergangenheit noch keine Kriechversuche in diesem Umfang durchgeführt worden. Für die Zeitstandversuche wird dazu eine bislang einzigartige Versuchsanlage aus sechs Prüfraumen mit Gasdruckfederbelastung konstruiert.

Der Silikonklebstoff Ottocoll S660 offenbart in diesen Dauerversuchen ein vergleichsweise moderates Kriechverhalten. Bei nolax C44.8505 treten dagegen im Verhältnis zu den Verformungen unter kurzzeitigen Einwirkungen deutlich größere zeitabhängige Verformungen in der Klebschicht auf, die zum Teil auch nach der Entlastung nicht vollständig zurückgehen. Der sehr steife Klebstoff Scotch-Weld DP 490 zeigt wiederum bei den untersuchten Lastniveaus keine signifikanten Kriechverformungen. Zusätzliche Kriechversuche an nolax C44.8505, die über die 1000 Stunden hinaus verlängert wurden, verdeutlichen zudem den Einfluss der Temperatur auf das Kriechverhalten. Als die Raumtemperatur in der Prüfhalle im Sommer ansteigt, treten nach einem längeren Zeitabschnitt ohne eindeutige Verformungszunahme erneut Kriechverformungen auf. Die Temperatur beträgt zu diesem Zeitpunkt etwa +23 °C. Der dadurch wieder erkennbar in Gang gesetzte Kriechvorgang führt bei der höchsten Laststufe zum Versagen der Prüfkörper. Die restlichen Prüfkörper bleiben bis zur Entlastung intakt. Die Kurvenverläufe deuten dabei nicht auf einen Abschluss der Kriechvorgänge

hin. Trotz der Vielzahl der Kriechversuche lässt sich kein unkritisches Lastniveau für den Klebstoff identifizieren, bei dem der Kriechvorgang annähernd zum Erliegen kommt.

Dieser Umstand ist ein offenkundiger Nachteil für die baupraktische Umsetzbarkeit einer dauerhaft lastabtragenden Klebung. Um diesen auszuräumen sind in Zukunft weitere Versuche unter langandauernder mechanischer Belastung und gleichzeitig erhöhtem Temperatureinfluss erforderlich. Die viskoelastischen Materialeigenschaften wirken sich allerdings nicht nur nachteilig aus. Infolge des Fließvermögens scheinen sich Spannungen in den Klebschichten aus dem silanterminierten Klebstoff umzulagern. Nach den Kriechversuchen weisen daher einige Prüfkörper ein leicht erhöhtes Tragvermögen gegenüber denen auf, die ohne Vorbelastung geprüft werden.

Aus der abschließenden Bewertung geht dennoch nolas C44.8505 als Vorzugsklebstoff hervor, da er optimal in dem zu Beginn definierten Steifigkeitsfenster lag. Angesichts der beschriebenen Defizite kann seine baupraktische Anwendbarkeit jedoch nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Für den deutlichen Gewinn an Tragvermögen und Steifigkeit müssen beim Einsatz dieses Klebstoffs Nachteile in Bezug auf seine UV-Beständigkeit und seine Kriechneigung im Vergleich zu bekannten Silikonklebstoffen in Kauf genommen werden. Der Klebstoff empfiehlt sich daher aus Gründen der Redundanz nur für Holz-Glas-Verbundelemente, die in Kombination mit konventionellen Aussteifungen, wie Kernen aus Massivholzplatten oder Stahlbeton, genutzt werden.

9.2 Ausblick

Mit den Langzeitstudien zum Kriechverhalten wird ein Grundstein für weiterführende Untersuchungen an Holz-Glas-Verbunden unter einer langandauernden Einwirkung gelegt. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich verstärkt den Parametern Temperatur und Luftfeuchte widmen. Der Vorzugsklebstoff reagiert empfindlich auf die Änderung dieser Einflussgrößen, die im Zuge dieser Arbeit nicht steuerbar waren. In Bezug auf die vermutete Lastumlagerung in der langen Klebfuge könnten Relaxationsversuche an Prüfkörpern mit gleichem Aufbau und Materialkombination die bisherigen Erkenntnisse untermauern und weiter ausbauen.

Ein wichtiger Schritt wäre überdies, die betrachteten Holz-Glas-Verbundbauteile mithilfe der Finite-Elemente-Methode zu berechnen. Anhand der numerischen Modelle ließen sich die Geometrie und das Tragverhalten weiter optimieren. Die mathematische Beschreibung des Materialverhaltens, die geometrische und materielle Nichtlinearitäten berücksichtigen sollte, kann sich auf die im Rahmen dieser Arbeit generierten Versuchsdaten stützen. Die Datenbasis ist aufgrund der unterschiedlichen Prüfkörpergrößen und Versuchskonfiguration sehr vielfältig. Die Kennwerte liegen sowohl für das reine Material als auch in Verbindung mit den relevanten Substraten Holz und Glas vor. Die Verifizierung der gewählten Materialmodelle ist dadurch auf mehreren Maßstabsebenen möglich.

In den Versuchen treten häufig Substratbrüche der Fügeteile aus Holz auf. Dabei verdeutlicht sich ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Festigkeiten und der Querkzugfestigkeit der untersuchten Holzarten. In Bezug auf die Festigkeit von Sperrholz senkrecht zur Plattenebene der Furnierlagen brachte eine Literaturrecherche jedoch kein Ergebnis. Beim Einsatz steifer Klebstoffe werden diese Werte allerdings für den statischen Nachweis der Koppelleiste benötigt. Experimentelle Untersuchungen zu diesem Materialkennwert wären daher von großem Interesse.

Ebenso bieten die auf Seiten des Klebstoffs identifizierten Schwachstellen in Bezug auf dessen UV-Beständigkeit neue Ansatzpunkte für weitere Forschungen. Durch Zusatz von Additiven und Füllstoffen lassen sich Klebstoffe gezielt modifizieren und an das Anforderungsprofil einer Fassadenanwendung anpassen. Da der Klebstoff nicht transparent sein muss, steht eine große Bandbreite an Zusatzstoffen zur Verbesserung der Alterungsbeständigkeit zur Verfügung.

Offen bleibt, inwieweit die künstliche Alterung den realen Umwelteinwirkungen auf ein Fassadenbauteil nahekommt. Freibewitterungsversuche bieten die Möglichkeit, Klebschichten realitätsnah zu altern. Langzeituntersuchungen im Labor sind häufig auf einige Monate begrenzt. Prognosen zur Dauerhaftigkeit der Klebverbindung in Relation zur tatsächlichen Lebensdauer eines Bauwerks bedürfen jedoch der weiteren Analyse unter realen Standortbedingungen. Experimentalbauten erlauben hier die regelmäßige Überwa-

chung der Klebverbindung unter natürlichen Umwelteinwirkungen. Letztendlich können nur gebaute Konstruktionen von der Leistungsfähigkeit der Klebverbindungen überzeugen. Daher sollte auf Initiativen für Pilotprojekte hingewirkt und nach Möglichkeiten zur Langzeitüberwachung der Klebung unter wirklichkeitsnahen Einwirkungssituationen gesucht werden.

Nicht zuletzt sollte überprüft werden, inwiefern die Erkenntnisse dieser Arbeit auch auf eine andere Bauteiltypologie übertragen werden können. Als Beispiel seien Verbundträger mit Holzflanschen und Glassteg genannt. Im Allgemeinen fehlen hier Erfahrungen zum Langzeitverhalten und zur Beständigkeit der Klebung. Die einzelnen Trägerteile werden üblicherweise über eine lange Klebfuge miteinander verbunden, die beim Durchbiegen des Trägers auf Schub beansprucht wird. Es bestehen somit enge Parallelen zu den hier untersuchten Schubfeldern.

10 Literatur

10.1 Fachbücher und Fachaufsätze

- Abeln 2011 Abeln, B.; Preckwinkel, E.: Entwicklung hybrider Stahl-Glas-Träger. In: Stahlbau 80 (2011), Heft 4, S. 218–225.
- Albers 2001 Albers, K.-J.: Moderner Holzhausbau in Fertigbauweise / Aktuelle Werkstoffe, Entwurfsplanung, Konstruktionen; Bauphysik und Haustechnik im Holzbau; Vorteile bei Vorfertigung und Montage. Kissing: WEKA Media, 2001.
- Althof 1984 Althof, W.: Verformungs- und Festigkeitseigenschaften von Klebstoffen bei Kurz- und Langzeitbeanspruchung. In: Fertigungssystem Kleben – Fachtagung mit Fachausstellung an der Technischen Universität Berlin, 4.–6. April 1984. Berlin: Publikation der Universitäts-Bibliothek, 1984, S. 141–162.
- Aßmus 2012 Aßmus, E.: Beanspruchungsanalyse und Klebstoffuntersuchung für lastabtragende Klebverbindungen in Holz-Glas-Verbundbauweise. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Baukonstruktion, 2012.
- Bedon 2013 Bedon C.; Amadio, C.: Buckling analysis of simply supported flat glass panels subjected to combined in-plane uniaxial compressive and edgewise shear loads. In: Engineering Structures, Vol. 59 (2013), S. 127–140.
- Bedon 2014 Bedon C.; Belis, J.; Enghardt, O. u. a.: Stability of glass elements – TG12 final report. In: Louter, C.; Bos, F.; Belis, J. u. a. (Hrsg.): Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference. Leiden: CRC Press, 2014, S. 661–669.
- Ber 2014 Ber, B.; Premrov, M.; Strukelj, A. u. a.: Static and dynamic testing of timber-glass composite wall panels. In: Louter, C.; Bos, F.; Belis, J., u. a. (Hrsg.): Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference. Leiden: CRC Press, 2014, S. 219–226.
- Blandini 2007 Blandini, L.: Structural use of adhesives for the construction of frameless glass shells. In: International Journal of Adhesion & Adhesives 27 (2007), S. 499–504.
- Blandini 2014 Blandini, L.; Sobek, W.: 10 Jahre Stuttgarter Glasschale – eine Zwischenbilanz. In: Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.): Glasbau 2014. Berlin: Ernst und Sohn, 2014, S. 77–86.
- Blyberg 2011a Blyberg, L.; Serrano, E.: Timber/Glass adhesively bonded I-beams. In: Glass Performance Days 2011 – Conference Proceedings. Tampere: 2011, S. 507–512.
- Blyberg 2011b Blyberg, L.: Timber/Glass Adhesive Bonds for Structural Applications. Licentiate Thesis. Linnæus University Växjö, 2011.
- Blyberg 2012 Blyberg, L.; Serrano, E.; Enquist, B.; Sterley, M.: Adhesive joints for structural timber/glass applications: Experimental testing and evaluation methods. International Journal of Adhesion & Adhesives 35 (2012), S. 76–87.
- Brockmann 2005 Brockmann, W.; Geiß, P. L.; Klingen, J. u. a.: Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- Carbary 2009 Carbary, L. D.; Hayez, V.; Wolf, A.; Bhandari, M.: Comparisons of Thermal Performance and Energy Consumptions of Facades Used in Commercial Buildings. In: Glass Performance Days 2009 – Conference Proceedings. Tampere: 2009, S. 89–94.
- Colling 2012 Colling, F.: Gebäudeaussteifung bei Gebäuden in Holztafelbauart. In: Der Bausachverständige 4/2012, S. 16–21.
- Correia 2011 Correia, R. J.; Valarinho, L.; Branco, F. A.: Post-cracking strength and ductility of glass-GFRP composite beams. In: Composite Structures 93 (2011), S. 2299–2309.
- Cruz 2008a Cruz, P.; Pequeno, J.: Structural Timber-Glass Adhesive Bonding. In: Bos, F.; Louter, C.; Veer, F. (Hrsg.): Challenging Glass. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft 2008. Amsterdam: IOS Press, 2008, S. 205–213.

- Cruz 2008b Cruz, P.; Pequeno, J.: Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour & Architectural Solutions. In: Bos, F.; Louter, C.; Veer, F. (Hrsg.): Challenging Glass. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft 2008. Amsterdam: IOS Press, 2008, S. 439–448.
- Cruz 2008c Cruz, P.; Pequeno, J.: Timber-Glass Composite Structural Panels: Experimental Studies & Architectural Applications. In: Bos, F.; Louter, C.; Veer, F. (Hrsg.): Challenging Glass. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft 2008. Amsterdam: IOS Press, 2008, S. 449–458.
- Ebert 2014 Ebert, J.: Einleitung hoher Lasten in Glaskanten – Ein Beitrag zum Einsatz von Kunststoffen als Klotzungsmaterial. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2014.
- Edl 2008 Edl, T.: Entwicklung von wandartig verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilungen des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe. Dissertation. Technische Universität Wien, 2008.
- Eekhout 2009 Eekhout, M.; Weber, L.; Niderehe, S.: Transparent Cubical Glass Building in Madrid. In: Glass Performance Days 2009 – Conference Proceedings. Tampere: 2009, S. 64–68.
- Ehrenstein 2003 Ehrenstein, G. W.; Riedel, G.; Trawiel, P.: Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen. 2., völlig überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2003.
- Engelsmann 2010 Engelsmann, S.; Spalding, V.; Peters, S.: Kunststoffe in Architektur und Konstruktion. Basel: Birkhäuser Verlag, 2010.
- Fadai 2015 Fadai, A.; Rinnhofer, M.; Winter, W.: Experimentelle Untersuchung des Langzeitverhaltens von verklebten Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. In: Weller, B., Tasche, S. (Hrsg.): Glasbau 2015. Berlin: Ernst & Sohn, 2015, S. 339–349.
- Fahrenheit 2011 Fahrenheit, H.: ISO 527-2011 – Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften. Vortrag auf der „testXpo – Fachmesse für Prüftechnik“ im Oktober 2011 in Ulm.
- Feldmann 2014 Feldmann, M.; Kasper, R. u. a.: Guidance for European Structural Design of Glass Components. JRC Scientific and Policy Reports, Report EUR 26439 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
- Feldmann 2015 Feldmann, M.; Kasper, R.: Glasbau im europäischen Kontext. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2015. Berlin: Ernst & Sohn, 2015, S. 607–701.
- Freytag 2004 Freytag, B.: Glass-Concrete Composite Technology. In: Structural Engineering International, Vol. 14, No. 2 (2004), S. 111–119.
- Gläser 1999 Gläser, H. J.: Dünnfilmttechnologie auf Flachglas. Schorndorf: Hofmann, 1999.
- Graf 2004 Graf, M.: Untersuchung zum hochfesten und witterungsbeständigen Kleben von Floatglas. Dissertation. Universität Kaiserslautern, 2004.
- Grellmann 2005 Grellmann, W.; Seidler, S. (Hrsg.): Kunststoffprüfung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2005.
- Habenicht 2006 Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006.
- Habenicht 2012 Habenicht, G.: Kleben – erfolgreich und fehlerfrei. 6., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- Hagl 2005 Hagl, A.: Kleben im Glasbau. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2005. Berlin: Ernst & Sohn, 2005, S. 823–861.
- Hall 2012 Hall, C.: Methoden zur elastischen und plastischen Modellierung von scheibenartig beanspruchten Holztafeln. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2012.
- Hamm 1999 Hamm, J.: Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas. Dissertation. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999.
- Harte 2007 Harte, R.; Krätzig, W. B.; Petryna Y. S.: Robustheit von Tragwerken – ein vergessenes Entwurfsziel. In: Bautechnik 84 (2007), Heft 4, S. 225–234.
- Härth 2013 Härth, K.: Beitrag zum Tragverhalten hybrider Träger aus Glas und Kunststoff. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2013.

Hegger 2007	Hegger, M.; Fuchs, M.; Stark, T. u. a.: Energieatlas, Nachhaltige Architektur. München: Edition Detail, 2007.
Hepp 2013	Hepp, C.: Geklebte Glaskonstruktionen nach ETAG 002 und nach nationalem Verfahren. In: Glas + Rahmen 09/2013, S. 18–21.
Hess 2000	Hess, R.: Glasträger. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2000.
Hinz 2015	Hinz, J.: Numerische Berechnung von Klebverbindungen zwischen Holz und Glas. Projektarbeit (unveröffentlicht), Technische Universität Dresden, 2015.
Hochhauser 2011a	Hochhauser, W.; Winter, W.; Kreher, K.: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen – State of the Art, Forschungsbericht, Studentische Arbeiten. Technische Universität Wien, 2011.
Hochhauser 2011b	Hochhauser, W.: Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben. Dissertation. Technische Universität Wien, 2011.
Hochhauser 2013	Hochhauser, W.; Winter, W.; Fadaei, A.: Entwicklung von verklebten Holz-Glaskonstruktionen, Bemessung und Anwendung. In: Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.): Glasbau 2013. Berlin: Ernst und Sohn, 2013, S. 186–191.
Huveners 2007	Huveners, E. M. P., van Herwijnen, F., Soetens, F. u. a.: In-plane loaded glass pane (shear wall). In: Glass Performance Days 2007 – Conference Proceedings. Tampere: 2007, S. 362–365.
Huveners 2009	Huveners, E. M. P.: Circumferentially Adhesive Bonded Glass Panes for Bracing Steel Frames in Façades. Dissertation. Eindhoven University of Technology, 2009.
Kammer 2006	zur Kammer, T.: Zum räumlichen Tragverhalten mehrgeschossiger Gebäude in Holztafelbauweise. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2006.
Kaufmann 2012	Kaufmann, H.; Strauch, R.: Ressourcenschonung durch Synergie: Hochbauten in Holz-Hybridbauweise. In: Detail Green 02/2012, S. 48–53.
Klein 2011	Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 9. überarb., erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
Kleinert 2011	Kleinert, H.; Liebrecht, F.: Kleben unterschiedlich konditionierter Glasoberflächen. In: adhäsion KLEBEN & DICHTEN 11/2011, 55. Jahrgang (2011), S. 32–36.
Klosowski 2009	Klosowski, J. M.; Wolf, A. T.: The History of Sealants. In: Mittal, K. L.; Pizzi, A. (Hrsg.): Handbook of Sealant Technology. Boca Raton: Taylor and Francis (CRC), 2009, S. 3–25.
Kohlmaier 1988	Kohlmaier, G.; Sartory, B. v.: Das Glashaus: Ein Bautypus des 19. Jahrhunderts. 2. Aufl., München: Prestel, 1988.
Kolb 1995	Kolb, J.: Systembau mit Holz. 3., aktualisierte Aufl. Dietikon: BauFachverlag, 1995.
Koppelkamm 1988	Koppelkamm, S.: Künstliche Paradiese – Gewächshäuser und Wintergärten des 19. Jahrhunderts. Berlin: Ernst & Sohn, 1988.
Kozłowski 2013	Kozłowski, M.; Serrano, E.; Enquist, B.: Experimental investigation on timber-glass composite I-beams. In: Louter, C.; Bos, F.; Belis J. u. a. (Hrsg.): Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference. Lausanne: 2014, S. 261–268.
Kozłowski 2014	Kozłowski, M.: Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams. PhD thesis. Silesian University of Technology, 2014.
Kreher 2004a	Kreher, K.: Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas. Dissertation. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.
Kreher 2004b	Kreher, K.; Natterer, Jul.; Natterer, Joh.: Timber-Glass-Composite Girders for a Hotel in Switzerland. In: Structural Engineering International (SEI), Vol. 14 (2004), No. 2, S. 149–151.
Kreuzinger 2005	Kreuzinger, H.; Niedermaier, P.: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen – Glas als Schubfeld. Tagungsband Ingenieurholzbau – Karlsruher Tage, 2005.

- Lahr 2013 Lahr, O.; Gumprecht, A.: SG-Fassade am Fraunhofer-Institut – Fassade mit 700 gebogenen Gläsern. In: Metallbau 24 (2013), Heft 4, S. 58–61.
- Lieb 2009 Lieb, K.; Schober, K. P.; Uehlinger, U.: Klebetechnik für Holzfenster. In: Glaswelt, Sonderheft Glaskleben im Fensterbau, 61. Jahrgang (2009), S. 10–13.
- Lieb 2013 Lieb, K.: „Sie hält und hält und hält ...“ – Structural Glazing Fassade im Dauertest. In: Tagungsband Rosenheimer Fenstertage. Rosenheim: 2013. S. 49–53.
- Lotz 1995 Lotz, S.: Untersuchungen zur Festigkeit und Langzeitbeständigkeit adhäsiver Verbindungen zwischen Fügepartnern aus Floatglas. Dissertation. Universität Kaiserslautern, 1995.
- Louter 2012 Louter, C.; Belis, J.; Veer, F. u. a.: Structural response of SG-laminated reinforced glass beams; experimental investigations on the effects of glass type, reinforcement percentage and beam size. In: Engineering Structures 36 (2012), S. 292–301.
- Luible 2004 Luible, A.: Stabilität von Tragelementen aus Glas. Dissertation. École Polytechnique Fédéral de Lausanne, 2004.
- Moro 2009 Moro, J. L.: Baukonstruktion – vom Prinzip zum Detail – Band 3: Umsetzung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- NABau 2014 DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) – Jahresbericht 2014. Berlin: DIN e.V., 2014.
- Natterer 2013 Natterer, J.: Einfach- und Hightech-Konstruktionen aus Holz – Eine Chance für energie- und nachhaltigkeitsbewusstes Bauen. In: Bautechnik 90 (2013), Heft 1, S. 47–50.
- Neubauer 2011 Neubauer, G.: Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich. Dissertation. Technische Universität Wien, 2011.
- Nicklisch 2014 Nicklisch, F.; Dorn, M.; Weller, B.; Serrano, E.: Joint study on material properties of adhesives to be used in load-bearing timber-glass composite elements. In: Proceedings of the international conference engineered transparency 2014, Düsseldorf 2014, S. 271–280.
- Nicklisch 2015a Nicklisch, F.; Weller, B.: Kriechverhalten von Klebverbindungen am Beispiel von Holz-Glas-Verbundelementen. In: Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.): Glasbau 2015. Berlin: Ernst & Sohn, 2015, S. 407–420.
- Nicklisch 2015b Nicklisch, F.; Hernandez Maetschl, S.; Schlehle, M. u. a.: Development of load-bearing timber-glass composite shear-wall elements. In: Glass Performance Days 2015 – Conference Proceedings. Tampere: 2015, S. 377–382.
- Niedermaier 2005 Niedermaier, P.: Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holztragwerken. Dissertation. Technische Universität München, 2005.
- Niemz 1993 Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1993.
- Pequeno 2009 Pequeno, J.; Cruz, P.: Timber-Glass Composite Structural Panels: Tectonics, Sustainability & Integrated Energetic System Solutions. In: Glass Performance Days 2009 – Conference Proceedings. Tampere: 2009, S. 123–126.
- Peters 2014 Peters, S.; Engelsmann, S.; Teich, M. u. a.: Konstruktiver Glasbau – Neue Techniken und innovative Entwicklungen. In: DBZ Deutsche Bauzeitschrift 62 (2014), Heft 5, S. 64–67.
- Petzold 1990 Petzold, A.; Marusch, H.; Schramm, B.: Der Baustoff Glas: Grundlagen, Eigenschaften, Erzeugnisse, Glasbauelemente, Anwendungen. 3., vollst. neu bearb., erw. Aufl. Berlin: Verlag für das Bauwesen, 1990.
- Popp 2015 Popp, C.: Entwicklung eines Konzeptes für lastabtragend geklebte Glasfassaden. Projektarbeit. Technische Universität Dresden, 2015 (unveröffentlicht).
- Qu 2000 Qu, J.: Untersuchung zur Langzeitbeständigkeit adhäsiver Verbindungen aus Floatglas und Kunststoffen. Dissertation. Universität Kaiserslautern, 2000.

- Recknagel 2012 Recknagel, C.: Potential of Dynamic-Mechanical Analysis Toward a Complementary Material and System Testing Approach for Structural Glazing. In: Wolf, A. T. (Hrsg.): Journal of ASTM International (JAI) – Selected Technical Papers STP1545 – Durability of Building Construction Sealants and Adhesives: 4th Volume. West Conshohocken: ASTM International, 2012, S. 404–431.
- Roth 1996 Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen Bd. 3: Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1996.
- Schaeffer 1993 Schaeffer, H. A.: Veränderung der Glasoberfläche während des Herstellungs- und Verarbeitungsprozesses. In: Peters, A.; Schaeffer, H. A.; Weißmann, R. u. a.: Veränderungen und Veredelungen von Glasoberflächen. HVG-Fortbildungskurse 1989. Frankfurt/M.: Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie, 2. Aufl. 1993.
- Schickhofer 2010 Schickhofer, G.; Bogensperger, T.; Moosbrugger, T. (Hrsg.): BSPHandbuch, Holz- Massivbauweise in Brettsperrholz: Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normenkonzepts. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2010.
- Schober 2006 Schober, K. P. et al.: Grundlagen zur Entwicklung einer neuen Holzfenstergeneration. Endbericht 1. Projektjahr. Wien: Holzforschung Austria, 2006.
- Schober 2007 Schober, K. P. et al.: Grundlagen zur Entwicklung einer neuen Holzfenstergeneration. Endbericht 2. Projektjahr. Wien: Holzforschung Austria, 2007.
- Seeger 2015 Seeger, J.: Entwicklung und statisch-konstruktive Analyse eines vorgefertigten Wand- und Fassadenelements als Holz-Glas-Verbundlösung. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Baukonstruktion, 2015.
- Shen 1996 Shen, X.; Techen H.; Wörner, J.-D.: Sicherheit von Glasfassaden. Bauforschung für die Praxis, Band 20. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1996.
- Siebert 2012 Siebert, G.; Maniatis, I.: Tragende Bauteile aus Glas – Grundlagen, Konstruktion, Bemessung, Beispiele. 2. Aufl., Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- Siebert 2015 Siebert, G.: Aktueller Stand der Glasnormung. In: Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.): Glasbau 2015. Berlin: Ernst & Sohn, 2015, S. 21–29.
- Sitte 2012 Sitte, S.; Wolf, A. T.: TSSA-bonded point-supported structural glazing of insulating glass units at Dow Corning's European Distribution Center. In: Tagungsband. engineered transparency. International conference at glasstec, Düsseldorf 2012. S. 307–314.
- Steinmetz 1992 Steinmetz, D.: Die Aussteifung von Holzhäusern am Beispiel des Holzrahmenbaus. In: Holzbau-Statik-Aktuell 07/1992, S. 3–10.
- Tasche 2007 Tasche, Silke: Strahlungshärtende Acrylate im Konstruktiven Glasbau. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2007.
- Vallabhan 1990 Vallabhan, C. V. G.; Chou, G.: Sealant Stresses in Structural Glazing: A Mathematical Model. In: O'Connor, T. F. (Hrsg.): Building Sealants: Material, Properties and Performance, ASTM STP 1069. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990.
- Voit 2014 Voit, K.; Tückmantel, P.; Nicklisch, F.; Kahlert, W.: Innovative Glaskonstruktionen im historischen Kontext, Schloss Grimma. In: Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.): Glasbau 2014. Berlin: Ernst & Sohn, 2014, S. 87–99.
- Wagenführ 2012 Wagenführ, A.; Scholz, F. (Hrsg.): Taschenbuch der Holztechnik. 2., aktualisierte Aufl. München: Hanser, 2012.
- Wagner 2002 Wagner, E.: Glasschäden – Oberflächenbeschädigungen, Glasbrüche in Theorie und Praxis. Schorndorf: Hofmann, 2002.
- Wagner 2012 Wagner, W.; Müller, U.: High-strength glass bonding – a new era in facade design? Tagungsband. engineered transparency. International conference at glasstec, Düsseldorf 2012, S. 315–322.

Wallner-Novak 2013	Wallner-Novak, M.; Koppelhuber, J.; Pock, K.: Brettsper Holz Bemessung – Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode. Wien: proHolz Austria, 2013.
Weller 2010a	Weller, B.; Döbel, F.; Nicklisch, F. u. a.: Geklebte Ganzglaskonstruktion für das Leibnitz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden. In: Stahlbau 79 (2010), Sonderheft S1: Konstruktiver Glasbau, S. 34–40.
Weller 2010b	Weller, B.; Meier, A.; Weimar, T. u. a.: Hybride Glasträger als Fassadenelemente. In: Stahlbau 79 (2010). Sonderheft S1: Konstruktiver Glasbau, S. 41–45.
Weller 2011	Weller, B.; Kothe, M.; Nicklisch, F. u. a.: Kleben im konstruktiven Glasbau. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2011. Berlin: Ernst & Sohn, 2011, S. 585–646.
Weller 2013a	Weller, B.; Krampe, P.; Reich, S.: Glasbau-Praxis – Konstruktion und Bemessung Band 1: Grundlagen. 3. Aufl. Berlin: Bauwerk/Beuth, 2013.
Weller 2013b	Weller, B.; Almus, E.; Nicklisch, F.: Assessment of the Suitability of Adhesives for Load-Bearing Timber-Glass Composite Elements. In: Glass Performance Days 2013 – Conference Proceedings. Tampere: 2013, S. 54–58.
Wellershoff 2008	Wellershoff, F.: Aussteifung von Gebäudehüllen durch randverklebte Glasscheiben. In: Stahlbau 77 (2008), Heft 1, S. 5–16.
Wolf 1976	Wolf, H.: Spannungsoptik. Berlin: Springer, 1976.
Wolf 2009	Wolf, A. T.: Sealant Durability and Service Life of Sealed Joints. In: Mittal, K. L.; Pizzi, A. (Hrsg.): Handbook of Sealant Technology. Boca Raton: Taylor and Francis (CRC), 2009, S. 143–189.

10.2 Normen und Richtlinien

ASTM E 1640	ASTM E 1640 – 04: Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Dynamic Mechanical Analysis.
BRL	Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C, Ausgabe 2014/2. Berlin, Deutsches Institut für Bautechnik, 2014.
DIN 1259-2	DIN 1259-2, September 2001: Glas – Teil 2: Begriffe für Glaserzeugnisse.
DIN 8580	DIN 8580, September 2003: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung
DIN 8593-0	Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines – Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
DIN 8593-8	Fertigungsverfahren Fügen – Teil 8: Kleben – Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
DIN 18008-1	DIN 18008-1, Dezember 2010: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen.
DIN 18008-2	DIN 18008-2, Dezember 2010: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen.
DIN 18008-3	DIN 18008-3, Juli 2013: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 3: Punktförmig gelagerte Verglasungen.
DIN 18008-4	DIN 18008-4, Juli 2013: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 4: Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen.
DIN 18008-5	DIN 18008-5, Juli 2013: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 5: Zusatzanforderungen an begehbare Verglasungen.
DIN 18008-6	E DIN 18008-6, Februar 2015: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 6: Zusatzanforderungen an zu Instandhaltungsmaßnahmen betretbare Verglasungen und an durchsturzsichere Verglasungen.
DIN 65583	DIN 65583, April 1999: Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung des Glasübergangs von Faserverbundwerkstoffen unter dynamischer Belastung.
DIN 68364	DIN 68364, Mai 2003: Kennwerte von Holzarten – Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten.
DIN EN 314-2	Deutsche Fassung EN 314-2, August 1993: Sperrholz – Qualität der Verklebungen – Teil 2: Anforderungen.

DIN EN 338	Deutsche Fassung EN 338, Februar 2010: Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen.
DIN EN 527-1	Deutsche Fassung EN 527-1, November 2012: Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften.
DIN EN 527-2	Deutsche Fassung EN 527-2, November 2012: Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 2: Floatglas.
DIN EN 1279-5	Deutsche Fassung EN 1279-5, November 2010: Glas im Bauwesen – Mehrscheiben-Isolierglas – Teil 5 : Konformitätsbewertung.
DIN EN 1748-1-1	Deutsche Fassung EN 1748-1-1, Dezember 2004: Glas im Bauwesen – Spezielle Basiserzeugnisse – Borosilicatgläser – Teil 1-1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften.
DIN EN 1863-1	Deutsche Fassung EN 1863-1, Februar 2012: Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas – Teil 1: Definition und Beschreibung.
DIN EN 1990	Deutsche Fassung EN 1990, Dezember 2010: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
DIN EN 1991-1-1	Deutsche Fassung EN 1991-1-1, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.
DIN EN 1991-1-1/NA	Nationaler Anhang DIN EN 1991-1-1, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.
DIN EN 1991-1-3	Deutsche Fassung EN 1991-1-3, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten.
DIN EN 1991-1-3/NA	Nationaler Anhang DIN EN 1991-1-3, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten.
DIN EN 1991-1-4	Deutsche Fassung EN 1991-1-4, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten.
DIN EN 1991-1-4/NA	Nationaler Anhang DIN EN 1991-1-4, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten.
DIN EN 1995-1-1	Deutsche Fassung EN 1995-1-1, Dezember 2010: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
DIN EN 1995-1-1/NA	Nationaler Anhang DIN EN 1995-1-1, August 2013: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
DIN EN 12150-1	Deutsche Fassung prEN 12150-1, Februar 2014: Glas im Bauwesen – Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas – Teil 1: Definition und Beschreibung.
DIN EN 13183-1	Deutsche Fassung EN 12183-1, Juli 2002: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren.
DIN EN 13022-1	Deutsche Fassung EN 13022-1, August 2014: Glas im Bauwesen – Geklebte Verglasungen – Teil 1: Glaskonstruktionen für Einfachverglasungen und Mehrfachverglasungen mit oder ohne Abtragung des Eigengewichtes.
DIN EN 13022-2	Deutsche Fassung EN 13022-2, August 2014: Glas im Bauwesen – Geklebte Verglasungen – Teil 2: Verglasungsvorschriften für Structural-Sealant-Glazing (SSG-) Glaskonstruktionen.
DIN EN 13830	Deutsche Fassung prEN 13830, Juni 2013: Vorhangfassaden – Produktnorm.
DIN EN 14351-1	Deutsche Fassung EN 14351-1, August 2010: Fenster und Türen – Produktnorm, Leistungseigenschaften – Teil 1: Fenster und Außentüren ohne Eigenschaften bezüglich Feuerschutz und/oder Rauchdichtheit.
DIN EN 15434	Deutsche Fassung EN 15434, Juli 2010: Glas im Bauwesen – Produktnorm für lastübertragende und/oder UV-beständige Dichtstoffe (für geklebte Verglasungen und/oder Isolierverglasungen mit exponierten Dichtungen).
DIN EN 16759	Deutsche Fassung prEN 16759, August 2014: Geklebte Verglasungen (SSGS).

DIN EN ISO 37	Deutsche Fassung EN ISO 37, Dezember 2011: Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Bestimmung der Zugfestigkeitseigenschaften.
DIN EN ISO 527-1	Deutsche Fassung EN ISO 527-1, Juni 2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
DIN EN ISO 527-2	Deutsche Fassung EN ISO 527-1, Juni 2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen.
DIN EN ISO 3231	Deutsche Fassung EN ISO 3231, Februar 1998: Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Beständigkeit gegen feuchte, Schwefeldioxid enthaltende Atmosphären.
DIN EN ISO 6721-1	Deutsche Fassung EN ISO 6721-1, August 2012: Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundlagen.
DIN EN ISO 10350-1	Deutsche Fassung EN ISO 10350-1, Januar 2010: Kunststoffe – Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Einpunktkennwerte – Teil 1: Formmassen.
DIN EN ISO 10365	Deutsche Fassung EN ISO 10365, August 1995: Klebstoffe – Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder.
DIN EN ISO 12543-1	Deutsche Fassung EN ISO 12543-1, Dezember 2011: Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas – Teil 1: Definitionen und Beschreibung von Bestandteilen.
ETAG 002-1	ETAG 002-1, Juli 1998: Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems – SSGS) – Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme.
ETAG 002-2	ETAG 002-2, Januar 2002: Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (SSGS) – Teil 2: Beschichtete Aluminium-Systeme.
ETAG 002-3	ETAG 002-3, März 2002: Bekanntmachung der Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems – SSGS) – Teil 3: Systeme mit thermisch getrennten Profilen
ift VE-08/02	ift-Richtlinie VE-08/2, September 2011: Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme.
ift VE-08/03	ift-Richtlinie VE-08/3, August 2014: Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme.
LTB II	Teil II der Liste der Technischen Baubestimmungen, Anwendungsregelungen für Bauprodukte und Bausätze nach harmonisierten Normen und Europäischen Bewertungsdokumenten für Europäische Technische Bewertungen nach der Bauproduktenverordnung sowie nach europäischen technischen Zulassungen nach der Bauproduktenrichtlinie – Ausgabe März 2014. In: Amtliche Mitteilungen Nr. 4 vom 13.11.2014. Berlin, Deutsches Institut für Bautechnik, 2014.
TRAV	TRAV, Januar 2003: Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen.
TRLV	TRLV, August 2006: Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen.
TRPV	TRPV, August 2006: Technische Regeln für die Bemessung und die Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen.

10.3 Zulassungen

ETA-03/0038	Europäische Technische Zulassung: Sikasil® SG500 Klebstoff zur Verwendung in geklebten Glaskonstruktionen. Sika Services AG, Zürich, Schweiz, Bescheid vom 16.03.2014.
ETA-06/0138	Europäisch Technische Zulassung: KLH-Massivholzplatten, massive plattenförmige Holzbauelemente für tragende Bauteile in Bauwerken. KLH Massivholz GmbH, Katsch an der Mur, Österreich, Bescheid vom 10.09.2012, Geltungsdauer bis 09.09.2017.
ETA-11/0392	Europäische Technische Zulassung: Sikasil® SG550 Klebstoff zur Verwendung in geklebten Glaskonstruktionen. Sika Services AG, Zürich, Schweiz, Bescheid vom 08.11.2011, Geltungsdauer bis 07.11.2016.

10.4 Produktdatenblätter und Broschüren

Araldite 2029	Araldite® 2029 – Fugenfüllender Zweikomponenten-Polyurethan Klebstoff. Technisches Datenblatt (02/2009). Huntsman Advanced Materials GmbH, Basel, 2009.
DELO-DUOPOX AD 840	DELO-DUOPOX® AD 840 – Universeller 2-K Epoxidharzklebstoff, Technisches Datenblatt (04/2012). DELO Industrie Klebstoffe GmbH, Windach, 2012.
DELO-PUR 9895	DELO-PUR® 9895 – Universeller 2-K Polyurethanklebstoff. Technisches Datenblatt (07/2015). DELO Industrie Klebstoffe GmbH, Windach, 2015.
Dow Corning 2011	Dow Corning Structural Glazing Handbuch. Dow Corning Corporation, 2011
Fasco 2013	FASCO®–Fassadensystem, Verklebte Glaselemente für den modernen Holz- und Metallbau. Knapp GmbH, Euratsfeld, 2013.
Finnforest 2001	Handbuch über Finnisches Sperrholz. Verband der Finnischen Forstindustrie, Lahti, 2001.
Henkel 2003	Sicherheitsdatenblatt Pril Original vom 22.08.2003, Henkel KGaA, Düsseldorf, 2003.
KLH 2013	Kreuzlagenholz. KLH Massivholz GmbH, Katsch/Mur, 2013.
Lithodecor 2015	Systemübersicht Lithodecor – Innovative Lösungen für die Fassade. Deutsche Amphibolin-Werke von Robert Murjahn Stiftung & Co KG, Netzschkau. Online: http://www.lithodecor.de/fileadmin/lithodecor/media/downloads/glass/Airtec_Glas_s_Technik.pdf [05.03.2015].
nolax C44.8505	nolax C44.8505 – Hochwertiger, elastischer 2K Klebstoff mit langer offener Zeit. Technisches Datenblatt (05/2012). nolax AG, Sempach-Station, 2012.
Ottocoll S660	OTTOCOLL® S660 – Das 2K-Silicon für Holz-Glas-Verbundelemente. Technisches Datenblatt (06/2012). Hermann Otto GmbH, Fridolfing, 2012.
Raico 2011	Raico Fassadensystem THERM+ Holz. RAICO Bautechnik GmbH, Pfaffenhausen, 2011.
Scotch-Weld DP 490	Scotch-Weld™ DP 490 – Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff auf Epoxidharzbasis für das EPX-System. Technisches Datenblatt (02/2003). 3M Deutschland GmbH, Neuss, 2003.
Sika 2011	Allgemeine Richtlinie – Structural Glazing mit Sikasil® Siliconklebstoffen. Version 2 (07/2011). Sika Deutschland GmbH, 2011.
SikaFast-5215	SikaFast®-5215 – Das schnelle 2-komponentige Klebstoffsystem für strukturelle Verklebungen. Technisches Datenblatt (12/2005). Sika Deutschland GmbH, Bad Urach, 2005.
Sto 2015	Glanzstücke der Fassadengestaltung – Leistungsspektrum Glas, Sto AG, Stühlingen. Online: http://www.sto.de/media/documents/download_broschuere/leistungsuebersicht/09661-462de_01_11-13_72dpi.pdf [05.03.2015].
Thermalbond 2009	Thermalbond® V2100 – Produktdatenblatt Polyurethanschaum-Abstandhalter (03/2009). SAINT-GOBAIN Performance Plastics S.A., Chaineux, 2009.
UNIGLAS 2014	Handbuch für die Planung und Erstellung von uniGlas® FACADE Holz-Glas-Verbundelementen. uniGlas® GmbH & Co. KG, Montabaur, 2014.

10.5 Internetressourcen

DBU 2013	„Bauen und Wohnen – ressourcenschonend und energieeffizient“: Neue DBU-Broschüre. Pressemitteilung der Deutsche Bundesstiftung Umwelt vom 14. Januar 2013, Nr. 4/2013, AZ 91410/08. https://www.dbu.de/media/1401131035337sg4.pdf [14.10.15].
DIBt 2014	EuGH verurteilt Deutschland wegen Handelshemmnissen bei Bauprodukten. Urteil vom 16.10.2014, Rs. C-100/13. Pressemitteilung des Deutschen Instituts für Bautechnik vom 17.04.2014. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2014. https://www.dibt.de/de/Fachbereiche/data/ZD5_Pressemitteilung_Gerichtsurteil_EuGH_16102014.pdf [12.04.2015].

EnOB 2015	Forschung für Energieoptimiertes Bauen (EnOB): Bürogebäude Z3 als Labor für nachhaltiges Bauen. http://www.enob.info/de/neubau/projekt/details/buerogebaeude-z3-als-labor-fuer-nachhaltiges-bauen/ [08.03.2015].
Gartner 2014	Josef Gartner GmbH: Closed Cavity Façades. http://josef-gartner.permasteelisagroup.com/de/about-gartner/products-services/closed-cavity-facades/ [15.06.2014].
TES 2014	TES EnergyFaçade: Multifunctional timberbased element system for improving energy efficiency of the building envelope. http://www.tesenergyfacade.com/index.php?id=13_tes [15.06.2014]
WECOBIS 2015	WECOBIS Ökologisches Baustoffinformationssystem: Basisgläser. http://www.wecobis.de/index.php?id=296&L=0 [01.03.2015].

11 Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Prinzipaufbau eines Holz-Glas-Verbundelements nach Edl (2008, S. 18).	15
Bild 2	Pilotprojekt mit Holz-Glas-Verbundfassade. © Dold und Hasenauer OG	17
Bild 3	Vorgehensweise bei den theoretischen und experimentellen Untersuchungen.	23
Bild 4	Materialstudien zum Holz-Glas-Verbund. Foto: Stefanie Flohr	25
Bild 5	Geklebtes Fenster (System walchfenster04). Foto: Walch GmbH	27
Bild 6	Holz-Glas-Verbundträger.	28
Bild 7	Holz-Glas-Verbundträger nach Biegeversuch. Foto: Klaus Kreher	29
Bild 8	Hotel Palafitte in Monruz (CH). Foto: Klaus Kreher.	30
Bild 9	Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise.	33
Bild 10	Innovativer Holzbau mit Holz-Glas-Verbundfassade. Foto: Franz Ebner	34
Bild 11	Holz-Glas-Verbundplatten.	36
Bild 12	Palmenhaus Bicton Gardens in Budleigh Salterton (UK). Foto: Stefan Koppelkamm	38
Bild 13	Demonstrator einer hybriden Fassadenkonstruktion. Foto: Friedrich May	40
Bild 14	Vergleich verschiedener Glas-Verbundträgerquerschnitte.	41
Bild 15	Gestaltung der Klebfuge nach Huveners 2007, S. 362.	45
Bild 16	Prinzipdarstellung verschiedener Verbindungsdetails zwischen Verglasungen und Holzrahmen.	47
Bild 17	Marktreife Holz-Glas-Verbundsysteme.	50
Bild 18	Koppelleiste mit Verzahnung. Foto: OTTO CHEMIE.	51
Bild 19	Holzskelettbau mit Primär- und Sekundärstruktur nach Kolb (1995, S. 28).	54
Bild 20	Prinzipaufbau einer Holztafel (graue Fläche) und Holztafelbau aus Kleintafeln nach Kolb (1995, S. 15).	54
Bild 21	Transport und Montage einer Holz-Wandtafel. Foto: Gump & Maier GmbH	55
Bild 22	Begehbarer Glasboden.	57
Bild 23	Spannungsverteilung in der Klebschicht und im Fügeeteil bei einer einschnittig überlappten Klebverbindung mit zentrischer Lasteinleitung nach Habenicht (2006, S. 415 und S. 417).	62
Bild 24	Designstudie auf der glasstec 2010 in Düsseldorf. Foto: Stefan Unnewehr	63
Bild 25	Prinzipdarstellung verschiedener Klebfugenvarianten.	68
Bild 26	Structural-Sealant-Glazing-Fassade. Foto: Steindl Glas	71
Bild 27	Unterscheidung der SSGTypen gemäß ETAG 002-1, Tab. 1 und Bild 1.	72
Bild 28	Horizontalschnitt und Ansicht eines Pfostens eines SSG-Bausatzes.	73
Bild 29	Fassade aus Holz, Aluminium und Glas. Foto: Ed. Zueblin AG	74
Bild 30	Ganzglaskonstruktion zum Schutz historischer Drucktanks. Foto: Stefan Unnewehr	76
Bild 31	Typische Nachweise im Glasbau am Beispiel einer allseitig gelagerten Horizontalverglasung aus Verbund-Sicherheitsglas.	78
Bild 32	Labor und Technikum am Fraunhofer Institut für Silicatforschung (ISC) in Würzburg. Foto: Christoph Seelbach, © Saint-Gobain Glass	81
Bild 33	Detaillschnitt durch das Haltesystem im Bereich der Horizontalverglasungen nach Lahr (2013).	81
Bild 34	Zusammenhang zwischen verschiedenen europäischen Normen zum Kleben von Glas nach prEN 16759 ergänzt um die zuständigen Technischen Gre-mien im CEN.	85
Bild 35	Wohn- und Geschäftshaus in Kasel (D). Foto: Linda Blatzek	91
Bild 36	Bezeichnungen und geometrische Definitionen für die Berechnung des Horizontallastanteils auf orthogonal angeordneten Wandscheiben eines Geschosses nach Steinmetz (1992, S. 8).	94
Bild 37	Schnittkräfte und Verformungen an einer Wandscheibe nach der Schubfeld-theorie.	96
Bild 38	Einfaches Federmodell für die Berechnung von Holz-Glas-Verbundelementen mit nachgiebiger Klebverbindung nach Kreuzinger (2005, S. 3 f.).	97

Bild 39	Prinzip des detaillierten Federmodells für die Berechnung von Wandscheiben in Holz-Glas-Verbundbauweise mit umlaufender Klebverbindung und zusätzlicher Verklotzung nach Hochhauser (2011a, S. 222).	98
Bild 40	Bezeichnungen und Geometrieangaben für die Berechnung der Federsteifigkeiten in einer Wandscheibe mit umlaufender Klebung zwischen Glas und einer Koppelleiste aus Holz.	99
Bild 41	Modellgebäude mit variierender Geschossanzahl.	101
Bild 42	Grundriss eines Regelgeschosses.	102
Bild 43	Vorfertigungsvarianten der Verbundfassade nach Nicklisch (2015b, S. 378).	104
Bild 44	Einwirkungen auf das Modellgebäude nach Seeger (2015, S. 41).	105
Bild 45	Charakteristische Horizontalkraft $F_{h,k}$ auf die Deckenplatte über der untersten Geschossebene des Modellgebäudes nach Seeger (2015, S. 52).	106
Bild 46	Kopfverschiebung eines 2,0 x 3,0 m großen Holz-Glas-Verbundelements.	110
Bild 47	Zusammenhang zwischen der Klebstoffnachgiebigkeit und der Steifigkeit eines 2,0 x 3,0 m großen HGV-Elements.	112
Bild 48	Verteilung der Horizontalkraft in x-Richtung auf die aussteifenden Holz-Glas-Verbundelemente	113
Bild 49	Maximale Beanspruchung eines einzelnen Holz-Glas-Verbundelements in der Fassade für die vier Varianten.	114
Bild 50	Änderung der Lastverteilung der Horizontalkraft.	115
Bild 51	Maximale Beanspruchung eines einzelnen Holz-Glas-Verbundelements in der Fassade für die Ausgangsvariante und die drei Ausfallszenarien.	116
Bild 52	Verteilung der Horizontallast in x- und in y-Richtung auf die Wandscheiben der Regelgeschossebene mit je vier aussteifenden Holz-Glas-Verbundelementen pro Fassadenseite und einem Kern aus Brettspertholz.	117
Bild 53	Verteilung der Horizontallast auf das Aussteifungssystem bei nachgiebigem Anschluss der Holz-Glas-Verbundelemente an die Decken.	119
Bild 54	Verteilung der Horizontallast auf das Aussteifungssystem bei starrem Anschluss der Holz-Glas-Verbundelemente an die Decken.	119
Bild 55	Vorversuchsprogramm zum Identifizieren geeigneter Klebstoffe für Holz-Glas-Verbundkonstruktionen.	123
Bild 56	Kantenqualitäten der Glassubstrate aus den Kleinteilversuchen.	125
Bild 57	Holzsubstrate für die Prüfkörper.	128
Bild 58	Versuchskonfiguration für einaxiale Zugversuche und Maße des Vielzweckprüfkörpers Typ 1A nach Prüfnorm DIN EN ISO 527-2.	136
Bild 59	Herstellen der Vielzweckprüfkörper unter Laborbedingungen.	137
Bild 60	Prüfvorrichtung für Scherversuche und Abmessungen des Prüfkörpers.	139
Bild 61	Kleben der Scherprüfkörper.	140
Bild 62	Ergebnisse der DMA bei 1 Hz am nachgiebigen Klebstoff vom Typ A.	143
Bild 63	Ergebnisse der DMA bei 1 Hz an semi-elastischen Klebstoffen vom Typ B.	143
Bild 64	Ergebnisse der DMA bei 1 Hz an steifen Klebstoffen vom Typ C.	143
Bild 65	Temperaturbereiche des Glasübergangs für alle untersuchten Klebstoffe.	144
Bild 66	Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus einaxialen Zugversuchen unter Standardprüfbedingungen (+25 °C 1 mm/min).	145
Bild 67	Ottocoll S660 (Typ A), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.	146
Bild 68	DELOPUR 9895 (Typ B), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.	148
Bild 69	nolax C44.8505 (Typ B), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.	148
Bild 70	SikaFast 5215 (Typ B), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.	148
Bild 71	Araldite 2029 (Typ C), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.	149

Bild 72	DUOPOX AD840 (Typ C), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.	149
Bild 73	ScotchWeld DP490 (Typ C), Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch für verschiedene Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten.	149
Bild 74	Bruchfestigkeit der Scherprüfkörper.	152
Bild 75	Beispiele typischer Bruchmuster im Scherversuch.	153
Bild 76	Übersicht über das Bruchverhalten der Scherprüfkörper bei tiefen und hohen Temperaturen sowie bei Raumtemperatur.	154
Bild 77	Hauptversuche an Prüfkörpern im Labormaßstab.	159
Bild 78	Geometrie und Abmessungen der Zug- und Scherprüfkörper.	165
Bild 79	Geometrie, Abmessungen und Versuchsanordnung des Scherprüfkörpers für die Kriechversuche.	166
Bild 80	Herstellen der Zugprüfkörper in der Klebvorrichtung.	167
Bild 81	Herstellen der Scherprüfkörper in der Klebvorrichtung.	167
Bild 82	Zug- und Scherprüfkörper nach der Aushärtung.	168
Bild 83	Vorrichtungen für die mechanische Prüfung des Haftvermögens und der Festigkeit der Klebschichten im Labormaßstab.	169
Bild 84	Mechanische Zusammenhänge im Scherversuch.	170
Bild 85	Prüfgerät mit Xenonlampen zur künstlichen UV-Bewitterung (Atlas Suntest XXL) mit geöffnetem Probenraum.	171
Bild 86	Reinigungsmittelbad.	172
Bild 87	Feuchteänderung für repräsentative Referenzproben.	173
Bild 88	Korrosionsprüfschrank zur SO ₂ -Bewitterung (VLM Typ CON 300-FL AIR CWC) mit eingelagerten Zug- und Scherprüfkörpern.	174
Bild 89	Mechanische Zeitstandprüfanlage (Coesfeld Materialtest) mit zehn Messstellen.	175
Bild 90	Anfangsfestigkeit der Klebschichten aus Scherversuchen.	177
Bild 91	Typische Bruchbilder aus den Scherversuchen.	178
Bild 92	Bruchverhalten der Scherprüfkörper.	179
Bild 93	Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung (repräsentative Messkurven) aus Scherversuchen an nolax C44.8505 und Ottocoll S660.	181
Bild 94	Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung (repräsentative Messkurven) aus Scherversuchen an Scotch-Weld DP 490 und Ottocoll S660.	181
Bild 95	Anfangsfestigkeit der Klebschichten aus Zugversuchen.	182
Bild 96	Holzbruch beim Zugversuch.	182
Bild 97	Optische Veränderung der Klebschicht nach UV-Lagerung (nolax C44.8505).	184
Bild 98	Optische Veränderung der Klebschicht nach 21-tägiger Lagerung in einem Bad aus Reinigungsmittellösung.	185
Bild 99	Restfestigkeit im Vergleich zum Ausgangswert vor der Alterung (Mittelwerte).	187
Bild 100	Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung der gealterten Prüfkörper (repräsentative Messkurven) aus Scherversuchen an nolax C44.8505.	188
Bild 101	Typische Versagensmuster bei nolax C44.8505 nach der UV-Bestrahlung.	189
Bild 102	Bruchverhalten von nolax C44.8505 in den Scherversuchen nach Alterung.	190
Bild 103	Bruchverhalten von nolax C44.8505 in den Zugversuchen nach Alterung.	190
Bild 104	Bruchverhalten von Scotch-Weld DP 490 in den Scherversuchen nach Alterung.	191
Bild 105	Bruchverhalten von Scotch-Weld DP490 in den Zugversuchen nach Alterung.	191
Bild 106	Kriechversuche an Zugscherproben mit Ottocoll S660.	196
Bild 107	Kriechversuche an Zugscherproben mit nolax C44.8505	196
Bild 108	Kriechversuche an Zugscherproben mit Scotch-Weld DP 490.	196
Bild 109	Irreversibel verformte Klebschicht aus nolax C44.8505 nach dem Kriechversuch bei $\tau = 1,50 \text{ N/mm}^2$.	199

Bild 110	Schubspannungs-Gleitungs-Werte bei Versagen der Zugscherprüfkörper im Kurzzeitversuch nach Vorbelastung durch 1000 Stunden Kriechbelastung.	199
Bild 111	Repräsentative Bruchbilder bei der Zugscherprüfung von Prüfkörpern, die in den Kriechversuchen vorbelastet wurden.	200
Bild 112	Großer Scherprüfkörper.	203
Bild 113	Vorbereitete Glasscheibe auf der Grundplatte.	205
Bild 114	Seitliches Befüllen der Klebfuge.	207
Bild 115	Abziehen des überschüssigen Klebstoffs.	207
Bild 116	Versuchsanordnung für Kriechversuche.	210
Bild 117	Versuchsanlage mit sechs Prüfraumen für Kriechversuche.	211
Bild 118	Visualisierung und statisches System des Lasteinleitungsmechanismus.	212
Bild 119	Detailaufnahme des Lasteinleitungsmechanismus für den Kriechversuch.	212
Bild 120	Detailaufnahme der digitalen Messuhr.	213
Bild 121	Versuchsanordnung für Tragfähigkeitsversuche unter Kurzzeitbeanspruchung.	214
Bild 122	Lasteinleitungsprinzip und Lage der Messsensoren im Kurzzeitversuch.	214
Bild 123	Positionen der Dehnungsmessstreifen (DMS) und Ergebnisse der numerischen Berechnung des Prüfkörpers nach Hinz (2015, S. 62).	215
Bild 124	Repräsentative Kraft-Verformungs-Beziehung für die Klebstoffe Ottocoll S660 (A), nolax C44.8505 (B) und Scotch-Weld DP 490 (C).	216
Bild 125	Typische Bruchbilder für die Klebstoffe Ottocoll S660 (1) und nolax C44.8505 (2).	217
Bild 126	Kurzzeitversuche an großen Scherprüfkörpern.	218
Bild 127	Polarisationsfilteraufnahmen der Verglasung bei einer Belastung von 20 kN nach Hinz (2015, S. 79).	220
Bild 128	Ergebnisse der Dehnungsmessung an der vertikalen Glaskante.	221
Bild 129	Kriechverformung der bauteilähnlichen Prüfkörper bei Ottocoll S660.	223
Bild 130	Kriechverformung der bauteilähnlichen Prüfkörper bei nolax C44.8505.	223
Bild 131	Kriechverformung der bauteilähnlichen Prüfkörper bei Scotch-Weld DP 490.	223
Bild 132	Kriechverformung und aufgezeichnete Raumklimadaten der Zeitstandversuche mit einer Dauer von mehr als 1000 Stunden bei nolax C44.8505.	227
Bild 133	Korrektur der Quell- und Schwindeinflüsse durch Referenzmessung.	229
Bild 134	Bruchwerte der Klebverbindung bei Prüfung der vorbelasteten Scherprüfkörper.	230
Bild 135	Festigkeitsverhältnis von gealterten zu nicht vorgeschädigten Scherprüfkörpern.	232
Bild 136	Festigkeitsverhältnis von gealterten zu nicht vorgeschädigten Zugprüfkörpern.	232
Bild 137	Vergleich der Kriechkurven aus Versuchen im Bauteil- und im Labormaßstab für Ottocoll S660.	237
Bild 138	Vergleich der Kriechkurven aus Versuchen im Bauteil- und im Labormaßstab für nolax C44.8505	237
Bild 139	Ansicht und Vertikalschnitt des Klebfugendetails.	242
Bild 140	Horizontalschnitt.	242

12 Tabellenverzeichnis

Tafel 1	Materialeigenschaften für ausgewählte Glasarten.	58
Tafel 2	Wandsteifigkeiten der Kernwände aus Brettspertholz.	108
Tafel 3	Eingangswerte und berechnete Federsteifigkeit in Längsrichtung für die Komponenten des HGV-Elements.	109
Tafel 4	Kennwerte der verwendeten Holzsubstrate.	128
Tafel 5	Herstellerangaben zu den ausgewählten Klebstoffen.	131
Tafel 6	Prüfbedingungen für den einaxialen Zugversuch.	137
Tafel 7	Einpunktkennwerte nach DIN EN ISO 10350-1 für die Klebstoffe der Vorauswahl.	151
Tafel 8	Gesamtübersicht zum Versuchsprogramm und zur Probenanzahl.	161
Tafel 9	Feuchtegehalt der Referenzproben vor Versuchsbeginn und nach Klimallagerung.	173
Tafel 10	Belastung der Prüfkörper in den Kriechversuchen.	175
Tafel 11	Schubmodul der repräsentativen Messkurve und der entsprechend berechnete Startwert der Anfangsverformung für jede Klebschicht.	194
Tafel 12	Versuchsprogramm für die bauteilähnlichen Prüfkörper.	208
Tafel 13	Kurzzeitversuche an großen Scherprüfkörpern.	218
Tafel 14	Lastniveaus für die Kriechversuche.	222
Tafel 15	Vergleichskennwerte aus Versuchen mit unterschiedlichen Prüfkörpern.	234

13 Bezeichnungen

13.1 Formelzeichen

Lateinische Großbuchstaben

A	Fläche (allgemein)
B_x	Scheibensteifigkeit in x-Richtung
B_y	Scheibensteifigkeit in y-Richtung
C	Federsteifigkeit
F	Kraft (allgemein)
F_h	Horizontalkraft
F_x	Kraft in x-Richtung
F_y	Kraft in y-Richtung
E	Elastizitätsmodul (allgemein)
E_t	Zugmodul
E'	Speichermodul (DMA)
E''	Verlustmodul (DMA)
$E_{m,0,mean}$	Mittelwert des Biegeelastizitätsmoduls in Faserrichtung (Vollholz)
$E_{m,90,mean}$	Mittelwert des Biegeelastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung (Vollholz)
$E_{m, }$	Mittelwert des Biegeelastizitätsmoduls parallel zur Deckfaser (Sperrholz)
$E_{m,\perp}$	Mittelwert des Biegeelastizitätsmoduls rechtwinklig zur Deckfaser (Sperrholz)
G	Schubmodul (allgemein)
G_G	Schubmodul Glas
G_m	Schubmodul (Mittelwert)
G_{KL}	Schubmodul Koppelleiste
G_R	Schubmodul Pfosten/Riegel
G_{rep}	Schubmodul einer repräsentativen Probe
G_τ	Schubmodul Klebfuge
$R_{u,5}$	5-Prozent-Quantilwert einer Stichprobe
T	Temperatur (allgemein)
T_{g0}	Temperatur am Beginn des Glasübergangs (Tangentenverfahren an E')
$T_g(\tan\delta_{max})$	Temperatur am Ende des Glasübergangs (Maximalwert des Verlustfaktors $\tan\delta$)
X_{mean}	Mittelwert einer Stichprobe

Lateinische Kleinbuchstaben

b	Breite (allgemein)
b_{KL}	Breite der Koppelleiste
b_R	Breite des Pfostens/Riegels
b_τ	Breite der Klebfuge
d	Dicke (allgemein)
d_{KL}	Dicke der Koppelleiste
d_R	Dicke des Pfostens/Riegels
d_τ	Dicke der Klebfuge
e_x	Lastexzentrizität in x-Richtung
e_y	Lastexzentrizität in y-Richtung
f_k	charakteristische Festigkeit
$f_{m,k}$	charakteristische Biegefestigkeit (Vollholz)
$f_{m, }$	charakteristische Biegefestigkeit parallel zur Deckfaser (Sperrholz)
$f_{m,\perp}$	charakteristische Biegefestigkeit rechtwinklig zur Deckfaser (Sperrholz)
h	Höhe (allgemein)
h_G	Höhe der Verglasung
k_u	Schubsteifigkeit in Längsrichtung
k_w	Schubsteifigkeit in Querrichtung

l	Länge (allgemein)
l_{τ}	Länge der Klebfuge
$l_{\bar{u}}$	Überlappungslänge der Klebfuge
t	Zeit
t_G	Glasdicke
t_{xy}	Schubfluss
u	Feuchtegehalt (Holz)/Verformung am Kopf eines Wandelements
x_s	x-Koordinate Schubmittelpunkt
y_s	y-Koordinate Schubmittelpunkt

Griechische Großbuchstaben

ΔT	Temperaturänderung
Δu	Änderung des Feuchtegehalts (Holz)
Δx	Verformung/Verschiebung (allgemein)
Δx_0	gemessene Anfangsverformung, elastischer Anteil (Kriechversuch)
$\Delta x_{0,theor}$	berechnete Anfangsverformung (Kriechversuch)
$\Delta x(t)$	zeitabhängige Verformung (Kriechversuch)
Δx_{ges}	gemessene Gesamtverformung (Kriechversuch)
Δx_{kor}	korrigierte Gesamtverformung (Kriechversuch)

Griechische Kleinbuchstaben

α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient (allgemein)
$\alpha_{T, }$	Wärmeausdehnungskoeffizient in Faserrichtung (Holz)
γ	Schubwinkel
$\tan \gamma$	Gleitung
$\tan \delta$	Verlustfaktor (DMA)
ε	Dehnung (allgemein)
ε_b	Bruchdehnung
ε_y	Streckdehnung
μ	Querdehnzahl/Poissonzahl
ρ	Dichte
ρ_m	Mittelwert der Rohdichte (Holz)
σ	Spannung (allgemein)
σ_b	Bruchspannung
σ_y	Streckspannung
σ_{50}	Spannung bei 50 % Dehnung
σ_{max}	Spannungsmaximum
σ_X	Standardabweichung
τ	Schubspannung
τ_b	Schubspannung bei Bruch
τ_{max}	Schubspannungsmaximum
$\tau_{a\beta}$	Exzentrizität einer Stichprobe

13.2 Abkürzungen

abP	allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AD840	Klebstoff DELO-DUOPOX® AD 840
ARAL2029	Klebstoff Araldite® 2029
BauPVO	Bauproduktenverordnung
BFU	Baufurniersperrholz (hier: aus Birke)
BPR	Bauproduktenrichtlinie
BRL	Bauregelliste
C44.8505	Klebstoff nolak C44.8505
CEN	European Committee for Standardization
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DMA	Dynamisch-mechanische Analyse
DMS	Dehnmessstreifen/Dehnungsmessstreifen
DP490	Klebstoff Scotch-Weld™ DP 490
EAD	Europäisches Bewertungsdokument (European Assessment Document)
EOTA	European Organisation for Technical Assessment
ESG	Einscheibensicherheitsglas
ETA	Europäische Technische Bewertung (European Technical Assessment)
	Europäische Technische Zulassung (European Technical Approval)
EuGh	Europäischer Gerichtshof
FEU	Befeuchtung bei Raumtemperatur (Kurzbezeichnung des Versuchs)
FG	Floatglas
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LF	Luftfeuchte
LTB	Liste der technischen Baubestimmungen
MBO	Musterbauordnung
MLTB	Muster-Liste der technischen Baubestimmungen
HGV	Holz-Glas-Verbund
PEI	Primärenergieinhalt/Primärenergiegehalt
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR9895	Klebstoff DELO-PUR® 9895
PVB	Polyvinyl-Butyral
rF	relative Luftfeuchte
RT	Raumtemperatur
REF	Referenzprüfung (Kurzbezeichnung des Versuchs)
REI	Reinigungsmittelagerung (Kurzbezeichnung des Versuchs)
S660	Klebstoff OTTOCOLL® S660
SF5215	Klebstoff Sika-Fast®-5215
SO2	Lagerung in SO ₂ -haltiger Atmosphäre (Kurzbezeichnung des Versuchs)
SSG	Structural Sealant Glazing
TC	Technisches Gremium (Technical Committee) im CEN
TPR	Prüfung bei +80 °C (Kurzbezeichnung des Versuchs)
TRO	Trocknung bei Raumtemperatur (Kurzbezeichnung des Versuchs)
TVG	teilvorgespanntes Glas
TWB	Temperaturwechselbeständigkeit
UV	ultraviolett
UV1	UV-Bestrahlung 500 h (Kurzbezeichnung des Versuchs)
UV2	UV-Bestrahlung 1000 h (Kurzbezeichnung des Versuchs)
VG	Verbundglas
VH	Vollholz (hier: aus Kiefer)
VSG	Verbund-Sicherheitsglas
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

Anhang A – Materialkennwerte zur Klebstoffauswahl

Ergebnisse der thermischen Analyse (DMA), des Zugversuchs und des Scherversuchs

Ottocoll® S660	272
DELO-PUR® 9895	274
nolax C44.8505	276
SikaFast® 5215	278
Araldite® 2029	280
DELO-DUOPOX® AD840	282
Scotch-Weld™ DP 490	284

Ottocoll® S660 – DMA und Zugversuch

Bild A.1

Dynamisch-mechanische Analyse bei 1 Hz, Mittelwert aus drei Einzelmessungen (Speichermodul E' durchgezogen, Verlustfaktor $\tan \delta$ gestrichelt).

Glasübergänge
 $T_{g0}/T_g(\tan \delta_{\max})$ in °C

Messung 1:	-43,9/-
Messung 2:	-43,6/-
Messung 3:	-42,4/-
Mittelwert:	-43,3/-

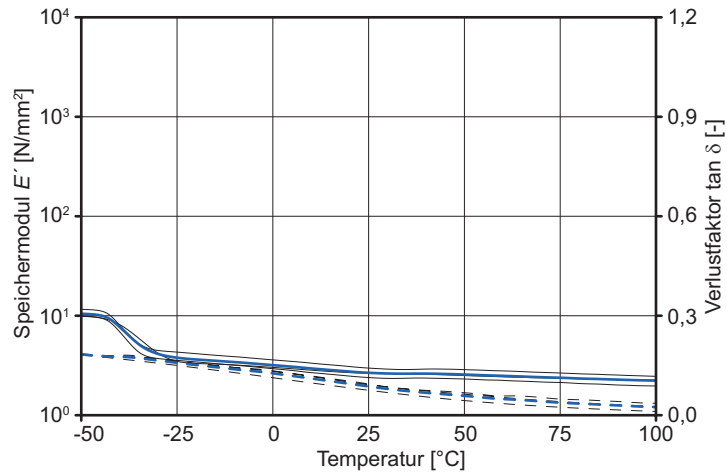


Bild A.2

Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch bei Variation von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit. Die Werte beziehen sich auf den Anfangsquerschnitt und die Ausgangsmesslänge.

Versuchsstopp bei
a $\varepsilon \geq 50$ % (1 mm/min)
b $\varepsilon \geq 100$ % (5 mm/min)

Zugmodul \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte zwischen 0,05 % und 0,25 % axialer Dehnung.

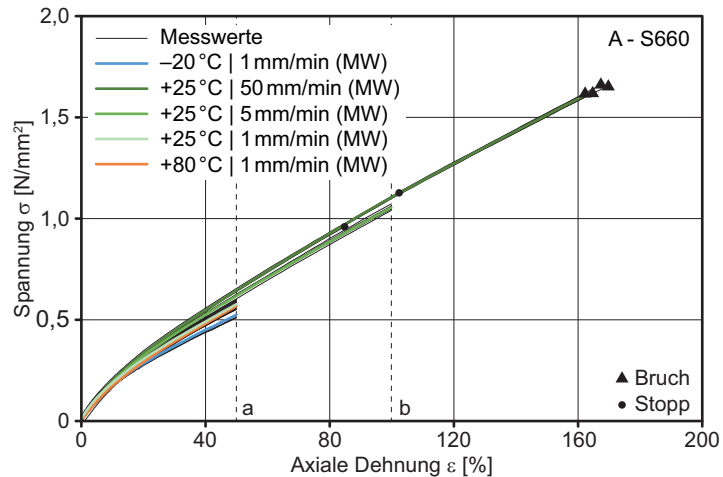
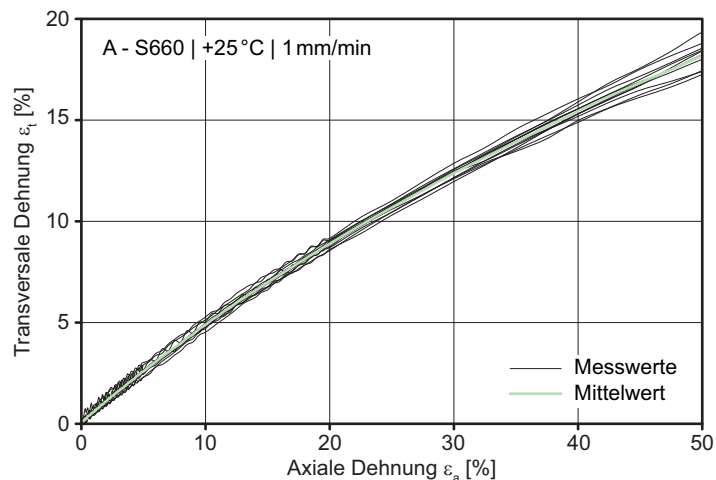


Bild A.3

Quer-Längsdehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch.

Querdehnzahl \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte der Quer-Längsdehnungsbeziehung zwischen 0,3 % und 1,5 % axialer Dehnung.



PK ID -20 °C	$E_{t,-20^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	PK ID +25 °C	$E_{t,+25^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	μ	PK ID +80 °C	$E_{t,+80^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]
A2-020	2,3	A2-013	2,5	0,51	A2-030	2,1
A2-021	3,1	A2-014	2,3	0,49	A2-031	2,2
A2-022	3,2	A2-015	2,8	0,52	A2-032	1,9
A2-023	3,4	A2-016	2,6	0,48	A2-033	1,9
A2-024	3,4	A2-017	2,4	0,48	A2-034	2,0
A2-025	3,4	A2-018	2,5	0,49	A2-035	2,0
		A2-019	3,1	0,48		
		A2-028	2,7	0,54		
		A2-029	4,5	0,52		
		A2-038	3,2	0,54		
		A2-039	4,3	0,54		
		A2-040	4,6	0,63		
Mittelwert	3,1		3,1	0,52		2,0
Stabw.	0,4		0,9	0,04		0,1

Tafel A.1

Zugmodul E_t und Querdehnzahl μ für unterschiedliche Prüftemperaturen bestimmt nach DIN EN ISO 527-1.

PK ID 5 mm/min	σ_b [N/mm ²]	ε_b [-]	PK ID 50 mm/min	σ_b [N/mm ²]	ε_b [-]	σ_{50} [N/mm ²]
A2-007	1,0 ^a	1,00	A2-001	— ^b	—	0,6
A2-008	1,0 ^a	1,00	A2-002	— ^b	—	0,7
A2-009	1,0 ^a	1,00	A2-003	1,6	1,63	0,6
A2-010	1,1 ^a	1,00	A2-004	1,7	1,66	0,6
A2-011	1,1 ^a	1,00	A2-005	1,7	1,68	0,6
A2-012	1,1 ^a	1,00	A2-006	1,6	1,62	0,6
Mittelwert	1,1			1,7	1,65	0,6
Stabw.	0,01			0,02	0,03	0,01

^a kein Bruch, Abbruchkriterium des Versuchs $\varepsilon = 100\%$

^b kein Bruch, Prüfkörper aus Spannbacke gerutscht

Tafel A.2

Spannungs- und Dehnungskennwerte der Messkurven aus dem einaxialen Zugversuch.

DELO-PUR® 9895 – DMA und Zugversuch

Bild A.4

Dynamisch-mechanische Analyse bei 1 Hz, Mittelwert aus drei Einzelmessungen (Speichermodul E' durchgezogen, Verlustfaktor $\tan \delta$ gestrichelt).

Glasübergänge

$T_{g0}/T_g(\tan \delta_{\max})$ in °C

T_{g0} manuell festgelegt, da automatische Berechnung unplausiblen Wert ausgibt.

Messung 1:	5,0/32,8
Messung 2:	5,0/30,8
Messung 3:	5,0/31,5
Mittelwert:	5,0/31,7

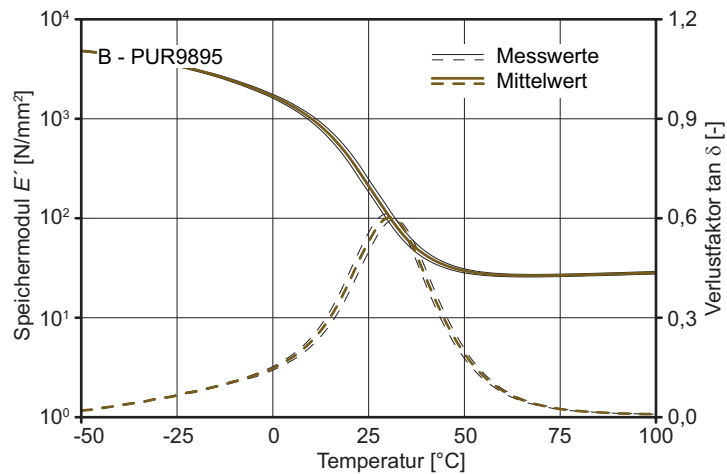


Bild A.5

Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch bei Variation von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit. Die Werte beziehen sich auf den Anfangsquerschnitt und die Ausgangsmesslänge.

Versuchsstopp bei $\varepsilon \geq 50$ % (1 mm/min)

Zugmodul \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte zwischen 0,05 % und 0,25 % axialer Dehnung.

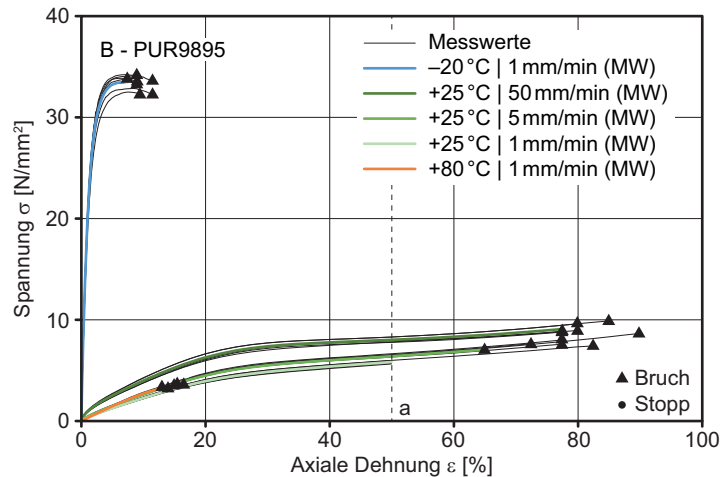
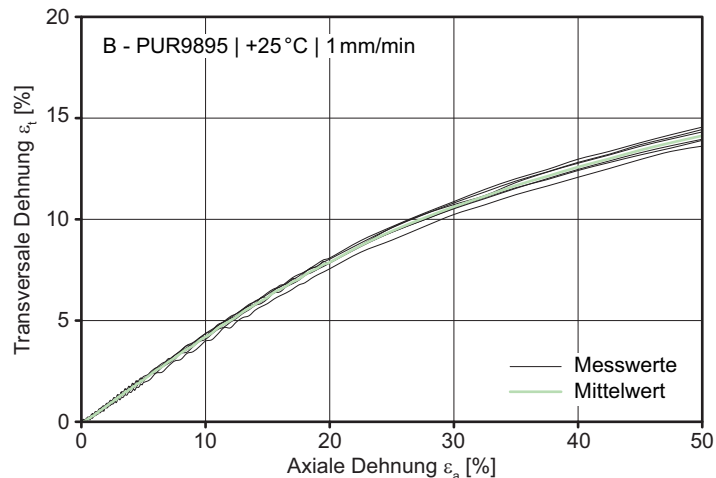


Bild A.6

Quer-Längsdehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch.

Querdehnzahl \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte der Quer-Längsdehnungsbeziehung zwischen 0,3 % und 1,5 % axialer Dehnung.



PK ID -20 °C	$E_{t,-20^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	PK ID +25 °C	$E_{t,+25^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	μ	PK ID +80 °C	$E_{t,+80^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]
B1-030	2148,0	B1-014	37,4	0,38	B1-021	29,1
B1-031	2455,7	B1-015	35,6	0,42	B1-022	34,6
B1-032	2585,3	B1-016	37,7	0,46	B1-024	31,8
B1-032	2518,2	B1-017	42,1	0,43	B1-025	30,5
B1-034	2732,2	B1-018	42,2	0,45	B1-026	29,6
B1-035	2050,3	B1-019	40,8	0,39		
Mittelwert	2406,8		39,3	0,42		31,1
Stabw.	241,2		2,8	0,03		2,2

Tafel A.3
Zugmodul E_t und Querdehnzahl μ für unterschiedliche Prüftemperaturen bestimmt nach DIN EN ISO 527-1.

PK ID 5 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	PK ID 50 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	σ_{50} [N/mm ²]
B1-001	8,0	0,78	B1-009	9,0	0,80	7,8
B1-002	7,6	0,78	B1-010	8,9	0,80	7,8
B1-003	7,1	0,66	B1-011	9,9	0,85	8,3
B1-004	7,5	0,82	B1-012	9,0	0,80	7,9
B1-005	7,7	0,74	B1-013	9,7	0,81	8,3
B1-006	8,7	0,90				
Mittelwert	7,8	0,78		9,3	0,81	8,0
Stabw.	0,6	0,08		0,5	0,02	0,3

Tafel A.4
Spannungs- und Dehnungskennwerte der Messkurven aus dem einaxialen Zugversuch.

DELO-PUR® 9895 – Scherversuch



Bild A.7
Typische Bruchbilder.

PK ID -20 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +25 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +80 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]
B1.007	6206,1	10,3	1,9	B1.001	3792,3	6,3	3,5	B1.015	172,6	0,3	0,5
B1.008	4746,7	7,9	1,3	B1.002	3245,8	5,4	2,2	B1.016	275,3	0,5	0,6
B1.009	2385,0	4,0	1,1	B1.003	3745,0	6,2	2,5	B1.017	71,1	0,1	0,3
B1.010	7740,3	12,9	1,9	B1.004	2809,3	4,7	2,3	B1.018	95,8	0,2	0,2
B1.011	5117,2	8,5	1,6	B1.005	2901,5	4,8	2,3				
B1.012	5539,2	9,2	1,8	B1.006	1869,8	3,1	1,0				
Mittelw.	5289,1	8,8			3060,6	5,1			153,7	0,3	
Stabw.	1770,3	3,0			713,4	1,2			91,9	0,2	

Tafel A.5
Einzelergbnisse.

nolac C44.8505 – DMA und Zugversuch

Bild A.8

Dynamisch-mechanische Analyse bei 1 Hz, Mittelwert aus drei Einzelmessungen (Speichermodul E' durchgezogen, Verlustfaktor $\tan \delta$ gestrichelt).

Glasübergänge
 $T_{g0}/T_g(\tan \delta_{\max})$ in °C

Messung 1:	16,0/81,3
Messung 2:	10,2/93,9
Messung 3:	—/—
Mittelwert:	13,1/87,6

Auswertung von Messung drei brachte kein Ergebnis.

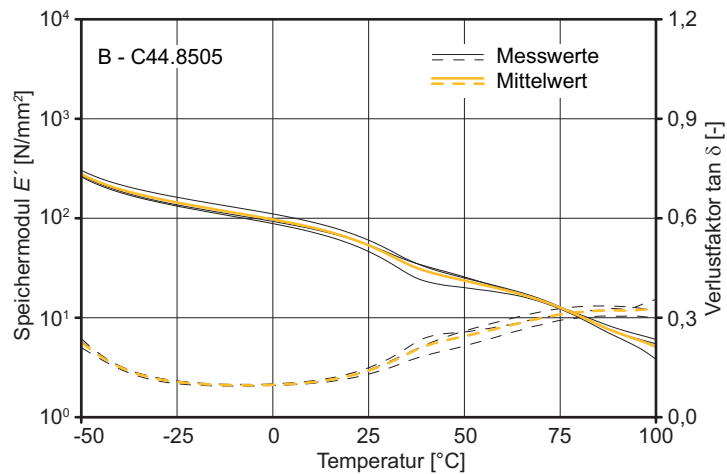


Bild A.9

Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch bei Variation von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit. Die Werte beziehen sich auf den Anfangsquerschnitt und die Ausgangsmesslänge.

Versuchsstopp bei
a $\varepsilon \geq 50$ % (1 mm/min)
b $\varepsilon \geq 100$ % (5 mm/min)

Zugmodul \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte zwischen 0,05 % und 0,25 % axialer Dehnung.

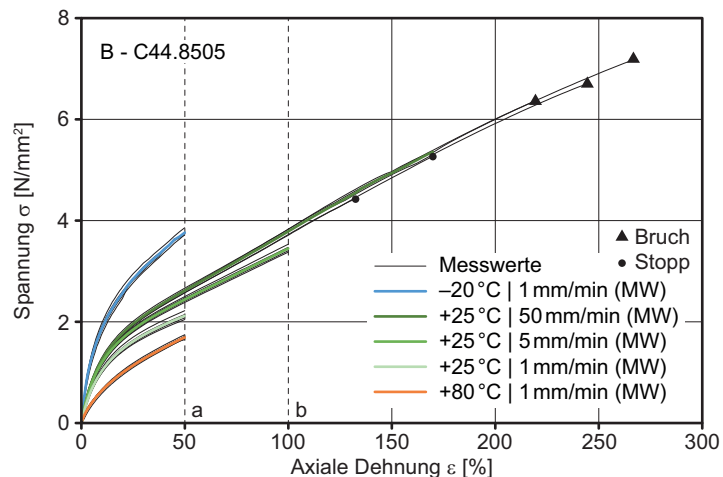
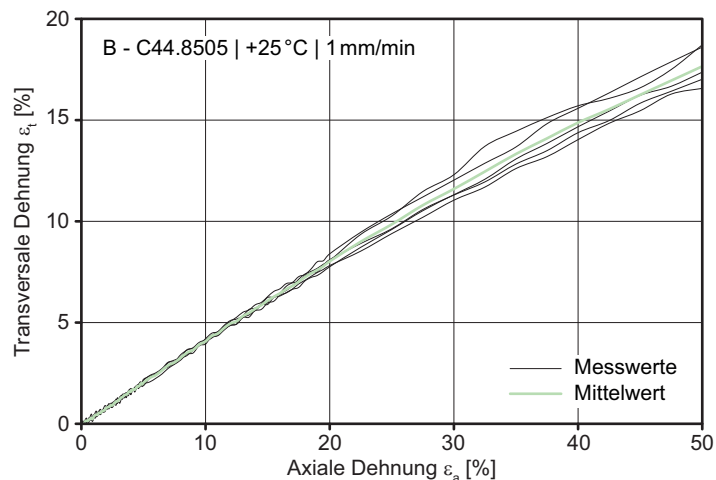


Bild A.10

Quer-Längsdehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch.

Querdehnzahl \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte der Quer-Längsdehnungsbeziehung zwischen 0,3 % und 1,5 % axialer Dehnung.



PK ID -20 °C	$E_{t,-20^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	PK ID +25 °C	$E_{t,+25^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	μ	PK ID +80 °C	$E_{t,+80^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]
B2-014	43,5	B2-026	13,4	0,36	B2-001	12,0
B2-016	52,6	B2-041	18,8	0,37	B2-003	14,3
B2-017	40,6	B2-043	17,9	0,42	B2-004	25,5
B2-020	35,6	B2-044	19,1	0,39	B2-006	13,4
B2-021	43,5	B2-045	20,5	0,38	B2-007	11,3
B2-022	37,7				B2-008	5,9
					B2-009	24,7
Mittelwert	42,3		17,9	0,39		15,3
Stabw.	6,0		2,7	0,02		7,2

Tafel A.6
Zugmodul E_t und Querdehnzahl μ für unterschiedliche Prüftemperaturen bestimmt nach DIN EN ISO 527-1.

PK ID 5 mm/min	σ_b [N/mm ²]	a_b [-]	PK ID 50 mm/min	σ_b [N/mm ²]	a_b [-]	σ_{50} [N/mm ²]
B2-027	3,4 ^a	1,00	B2-036	— ^b	—	2,6
B2-029	3,5 ^a	1,00	B2-037	— ^c	—	2,6
B2-031	3,4 ^a	1,00	B2-038	7,2	2,58	2,7
B2-032	3,5 ^a	1,00	B2-039	6,4	2,13	2,6
B2-033	3,5 ^a	1,00	B2-040	6,7	2,38	2,6
B2-034	3,5 ^a	1,00				
Mittelwert	3,5			6,8	2,36	2,6
Stabw.	0,1			0,4	0,23	0,0

^a kein Bruch, Abbruchkriterium des Versuchs $\varepsilon = 100\%$

^b kein Bruch, Versuchstopp da Belastungsgrenze Prüfraumen ausgelöst.

^c kein Bruch, Versuchstopp nach Ausfall Videoextensometer.

Tafel A.7
Spannungs- und Dehnungskennwerte der Messkurven aus dem einaxialen Zugversuch.

nolax C44.8505 – Scherversuch



Bild A.11
Typische Bruchbilder.

PK ID -20 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +25 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +80 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]
B2.025	—	—	—	B2.019	3680,2	6,1	4,4	B2.031	1945,1	3,2	4,3
B2.026	7037,5	11,7	4,5	B2.020	2987,4	5,0	3,9	B2.032	2253,8	3,8	4,6
B2.027	—	—	—	B2.021	2788,8	4,6	4,1	B2.033	2092,2	3,5	2,4
B2.028	5645,7	9,4	4,8	B2.022	3422,4	5,7	4,1	B2.034	1796,4	3,0	2,9
B2.029	6150,3	10,3	4,8	B2.023	3131,5	5,2	3,8	B2.035	1406,5	2,3	2,3
B2.030	—	—	—	B2.024	2798,0	4,7	3,8	B2.036	1776,8	3,0	2,8
Mittelw.	6277,8	10,5			3134,7	5,2			1878,5	3,1	
σ_x	704,6	1,2			356,4	0,6			293,6	0,5	

Tafel A.8
Einzelergebnisse.

SikaFast 5215 – DMA und Zugversuch

Bild A.12

Dynamisch-mechanische Analyse bei 1 Hz, Mittelwert aus drei Einzelmessungen (Speichermodul E' durchgezogen, Verlustfaktor $\tan \delta$ gestrichelt).

Glasübergänge
 $T_{g0}/T_g(\tan \delta_{\max})$ in °C

Messung 1:	12,3/54,8
Messung 2:	3,1/54,5
Messung 3:	9,0/54,1
Mittelwert:	8,1/54,5

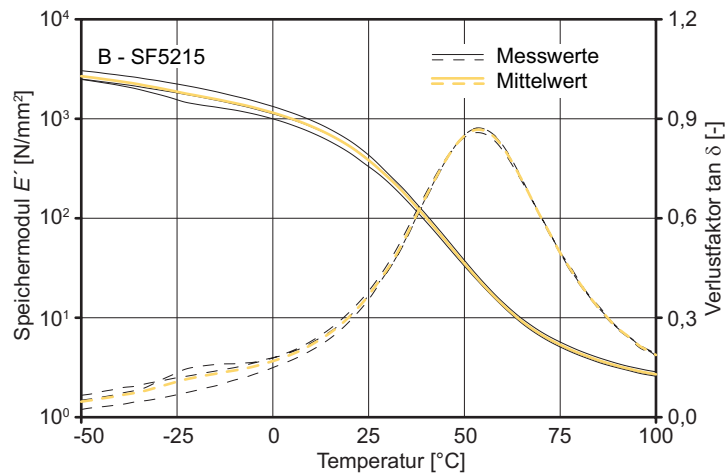


Bild A.13

Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch bei Variation von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit. Die Werte beziehen sich auf den Anfangsquerschnitt und die Ausgangsmesslänge.

Versuchsstopp bei
 a $\varepsilon \geq 50$ % (1 mm/min)
 b $\varepsilon \geq 100$ % (5 mm/min)

Zugmodul \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte zwischen 0,05 % und 0,25 % axialer Dehnung.

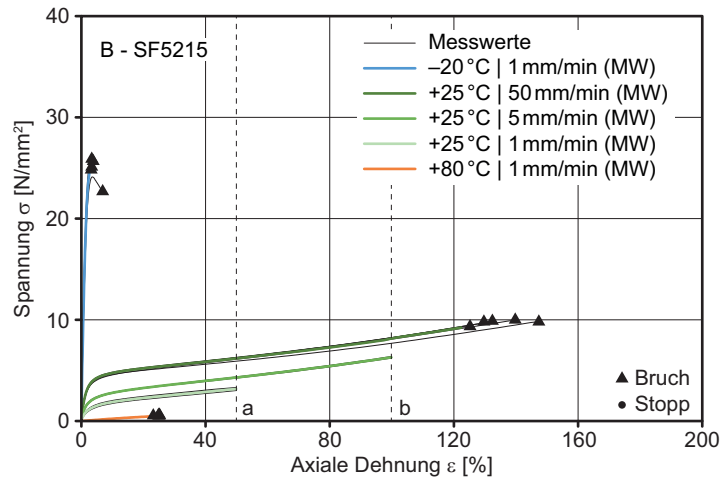
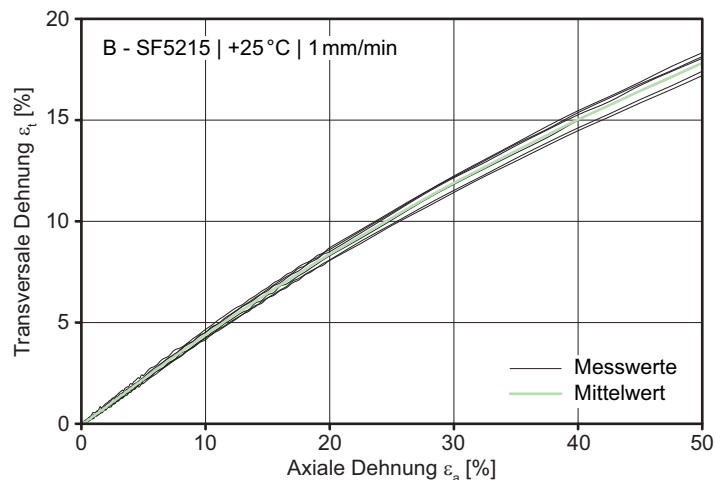


Bild A.14

Quer-Längsdehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch.

Querdehnzahl \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte der Quer-Längsdehnungsbeziehung zwischen 0,3 % und 1,5 % axialer Dehnung.



PK ID -20 °C	$E_{t,-20^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	PK ID +25 °C	$E_{t,+25^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	μ	PK ID +80 °C	$E_{t,+80^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]
B3-025	1492,5	B3-012	107,5	0,48	B3-019	1,3
B3-026	1604,1	B3-013	114,0	0,48	B3-020	1,6
B3-027	1925,3	B3-015	102,1	0,38	B3-021	2,6
B3-028	1535,3	B3-016	108,4	0,45	B3-023	2,5
		B3-017	86,1	0,41	B3-024	2,7
		B3-018	85,7	0,39		
Mittelwert	1639,3		100,6	0,43		2,1
Stabw.	196,1		12,0	0,04		0,6

PK ID 5 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	PK ID 50 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	σ_{50} [N/mm ²]
B3-006	6,3 ^a	1,00	B3-001	9,4	1,24	6,3
B3-008	6,3 ^a	1,00	B3-002	9,7	1,00	6,3
B3-009	6,4 ^a	1,00	B3-003	9,8	1,32	5,9
B3-010	6,2 ^a	1,00	B3-004	10,0	1,35	6,1
B3-011	6,3 ^a	1,00	B3-005	9,8	1,33	6,3
Mittelwert	6,3			9,7	1,25	6,2
Stabw.	0,1			0,2	0,15	0,2

^a kein Bruch, Abbruchkriterium des Versuchs $\varepsilon = 100\%$

Tafel A.9

Zugmodul E_t und Querdehnzahl μ für unterschiedliche Prüftemperaturen bestimmt nach DIN EN ISO 527-1.

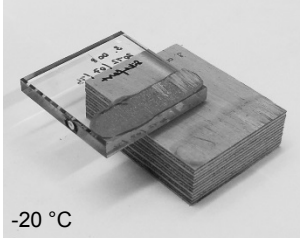
Bei -20 °C sind nur die Messergebnisse von vier Prüfkörpern verwertbar, da die Proben Luftfeinschlüsse aufwiesen oder nicht den Maßtoleranzvorgaben entsprachen.

Tafel A.10

Spannungs- und Dehnungskennwerte der Messkurven aus dem einaxialen Zugversuch.

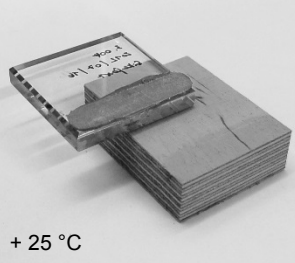
SikaFast 5215 – Scherversuch

Adhäsionsversagen auf Holz
und Substratbruch Holz



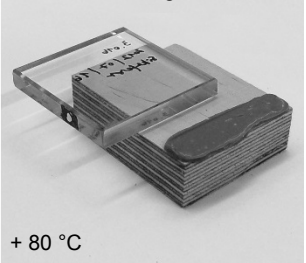
-20 °C

Adhäsionsversagen auf Holz



+ 25 °C

Adhäsionsversagen auf Glas



+ 80 °C

Bild A.15

Typische Bruchbilder.

PK ID -20 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +25 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +80 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]
B3.007	2036,4	3,39	1,2	B3.001	2094,4	3,49	2,8	B3.013	304,6	0,51	0,9
B3.008	2466,0	4,11	2,7	B3.002	2355,7	3,93	2,4	B3.014	458,4	0,76	1,1
B3.009	2822,8	4,70	1,4	B3.003	1772,5	2,95	2,0	B3.017	418,3	0,70	3,4
B3.010	2633,1	4,39	1,4	B3.004	2029,0	3,38	2,7	B3.018	409,5	0,68	3,5
B3.011	2269,7	3,78	1,3	B3.005	2319,2	3,87	3,2				
B3.012	2317,1	3,86	1,3	B3.006	1757,8	2,93	2,5				
Mittelw.	2424,2	4,04			2054,8	3,42			397,7	0,66	
σ_x	279,3	0,47			257,1	0,43			65,6	0,11	

Tafel A.11

Einzelergebnisse.

Araldite® 2029 – DMA und Zugversuch

Bild A.16

Dynamisch-mechanische Analyse bei 1 Hz, Mittelwert aus drei Einzelmessungen (Speichermodul E' durchgezogen, Verlustfaktor $\tan \delta$ gestrichelt).

Glasübergänge
 $T_{g0}/T_g(\tan \delta_{\max})$ in °C

Messung 1:	10,6/45,4
Messung 2:	20,1/49,3
Messung 3:	24,2/50,9
Mittelwert:	18,3/48,5

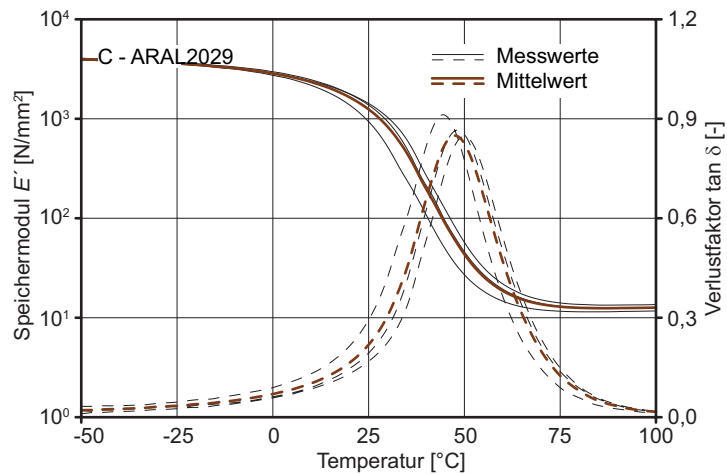


Bild A.17

Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch bei Variation von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit. Die Werte beziehen sich auf den Anfangsquerschnitt und die Ausgangsmesslänge.

Versuchsstopp bei
 $\varepsilon \geq 50$ % (1 mm/min)

Zugmodul \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte zwischen 0,05 % und 0,25 % axialer Dehnung.

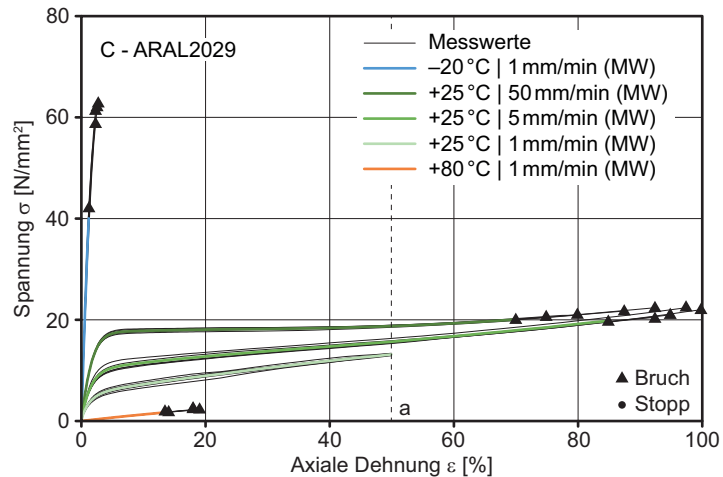
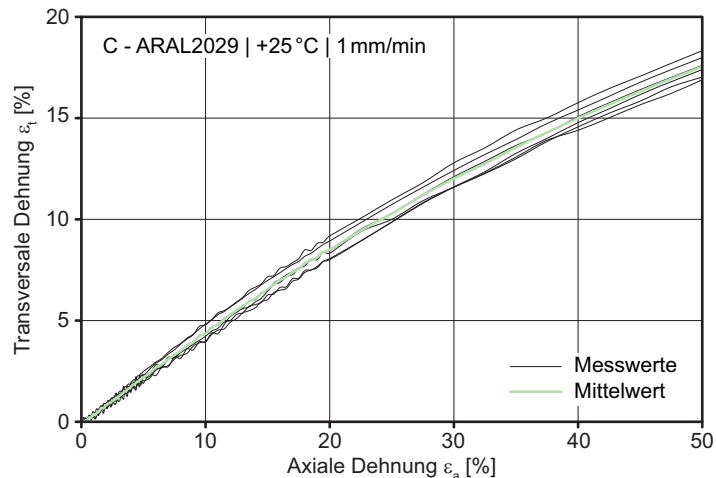


Bild A.18

Quer-Längsdehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch.

Querdehnzahl \rightarrow lineare Regression über alle Messpunkte der Quer-Längsdehnungsbeziehung zwischen 0,3 % und 1,5 % axialer Dehnung.



PK ID -20 °C	$E_{t,-20^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	PK ID +25 °C	$E_{t,+25^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	μ	PK ID +80 °C	$E_{t,+80^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]
C1-022	3365,9	C1-008	372,9	0,37	C1-031	10,8
C1-023	3371,3	C1-009	435,5	0,43	C1-034	13,1
C1-024	3300,5	C1-010	384,6	0,50	C1-038	10,3
C1-025	3887,5	C1-011	438,8	0,48	C1-029	12,2
C1-027	3371,9	C1-012	411,3	0,38	C1-039	12,3
C1-028	3155,1	C1-019	441,2	0,39	C1-040	10,9
Mittelwert	3408,7		414,0	0,42		11,6
Stabw.	248,9		29,6	0,05		1,1

Tafel A.12
Zugmodul E_t und Querdehnzahl μ für unterschiedliche Prüftemperaturen bestimmt nach DIN EN ISO 527-1.

PK ID 5 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	PK ID 50 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	σ_{50} [N/mm ²]
C1-001	22,5	0,99	C1-013	20,6	0,76	18,9
C1-002	19,7	0,85	C1-014	22,5	0,94	18,8
C1-003	20,5	0,93	C1-015	21,0	0,79	18,9
C1-004	23,2	1,08	C1-016	21,8	0,88	18,7
C1-006	21,1	0,96	C1-018	19,9	0,71	18,5
Mittelwert	21,4	0,96		21,1	0,82	18,8
Stabw.	1,4	0,08		1,0	0,09	0,2

Tafel A.13
Spannungs- und Dehnungskennwerte der Messkurven aus dem einaxialen Zugversuch.

Araldite® 2029 – Scherversuch



Bild A.19
Typische Bruchbilder.

PK ID -20 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +25 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +80 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]
C1.007	422,0	0,70	2,9	C1.001	387,9	0,65	0,7	C1.013	65,5	0,11	1,2
C1.009	312,1	0,52	2,0	C1.002	372,0	0,62	0,5	C1.014	26,2	0,04	0,8
C1.008	346,6	0,58	0,3	C1.003	448,7	0,75	0,7	C1.015	31,1	0,05	1,2
C1.010	927,8	1,55	0,6	C1.004	520,1	0,87	0,7	C1.016	95,0	0,16	1,3
C1.011	944,0	1,57	1,0	C1.005	744,9	1,24	0,6	C1.017	64,4	0,11	1,0
C1.012	946,8	1,58	0,7	C1.006	845,2	1,41	0,7	C1.018	40,3	0,07	0,8
Mittelw.	649,9	1,08			553,2	0,92			53,7	0,09	
Stabw.	319,3	0,53			197,1	0,33			26,1	0,04	

Tafel A.14
Einzelergbnisse.

DELO-DUOPOX® AD840 – DMA und Zugversuch

Bild A.20

Dynamisch-mechanische Analyse bei 1 Hz, Mittelwert aus drei Einzelmessungen (Speichermódul E' durchgezogen, Verlustfaktor $\tan \delta$ gestrichelt).

Glasübergänge
 $T_{g0}/T_g(\tan \delta_{\max})$ in °C

Messung 1:	50,4/66,5
Messung 2:	50,8/68,1
Messung 3:	51,1/67,8
Mittelwert:	50,8/67,5

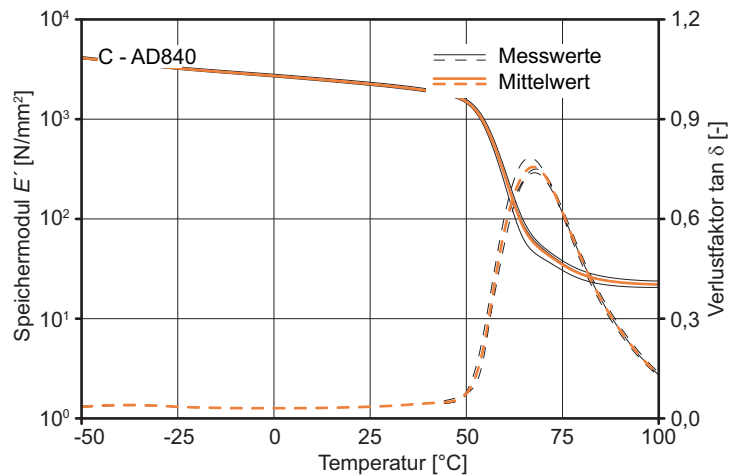


Bild A.21

Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch bei Variation von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit. Die Werte beziehen sich auf den Anfangsquerschnitt und die Ausgangsmesslänge.

Zugmodul → lineare Regression über alle Messpunkte zwischen 0,05 % und 0,25 % axialer Dehnung.

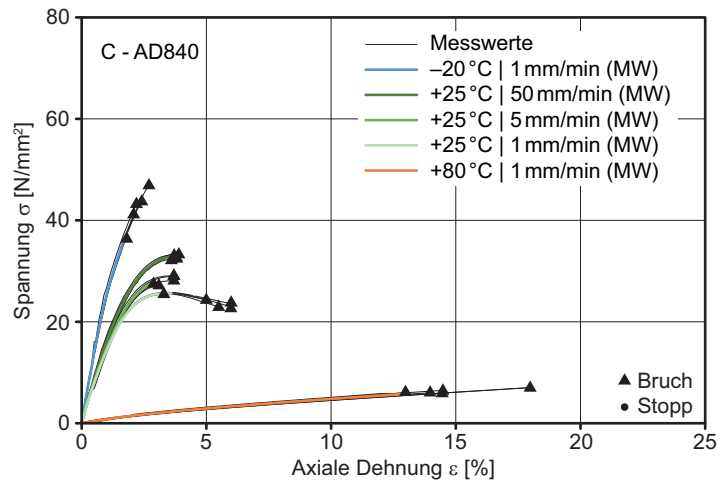
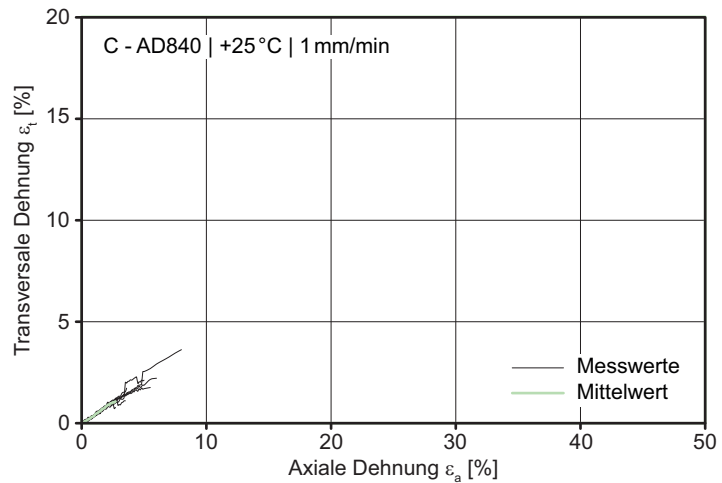


Bild A.22

Quer-Längsdehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch.

Querdehnzahl → lineare Regression über alle Messpunkte der Quer-Längsdehnungsbeziehung zwischen 0,3 % und 1,5 % axialer Dehnung.



PK ID -20 °C	$E_{t,-20^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	PK ID +25 °C	$E_{t,+25^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	μ	PK ID +80 °C	$E_{t,+80^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]
C2-002	2670,7	C2-021	1786,0	0,40	C2-011	111,0
C2-003	2616,5	C2-022	1546,0	0,44	C2-012	34,3
C2-004	2759,1	C2-023	1555,9	0,39	C2-013	22,9
C2-005	2919,4	C2-025	1633,4	0,57	C2-015	89,7
C2-006	2848,0	C2-026	1677,7	0,36	C2-016	78,4
					C2-017	105,1
Mittelwert	2762,7		1639,8	0,43		73,6
Stabw.	124,1		98,4	0,08		36,9

Tafel A.15

Zugmodul E_t und Querdehnzahl μ für unterschiedliche Prüftemperaturen bestimmt nach DIN EN ISO 527-1.

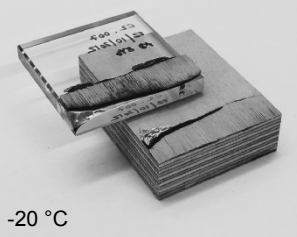
PK ID 5 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	PK ID 50 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	σ_{50} [N/mm ²]
C2-028	29,1	0,036	C2-034	32,3	0,037	—
C2-029	27,8	0,030	C2-035	32,8	0,038	—
C2-030	29,0	0,037	C2-036	33,4	0,040	—
C2-032	28,1	0,036	C2-037	32,8	0,038	—
C2-033	27,2	0,031	C2-040	33,2	0,037	—
Mittelwert	28,2	0,034		32,9	0,038	
Stabw.	0,8	0,003		0,4	0,001	

Tafel A.16

Spannungs- und Dehnungskennwerte der Messkurven aus dem einaxialen Zugversuch.

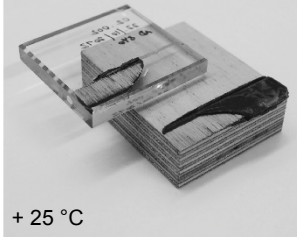
DELO-DUOPOX® AD840 – Scherversuch

Adhäsionsversagen auf Holz
und Substratbruch Holz | Glas



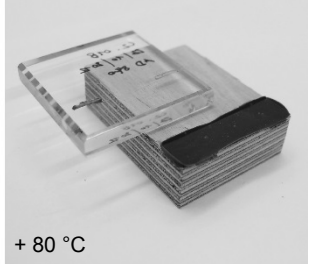
-20 °C

Adhäsionsversagen auf Glas
und Substratbruch Holz



+ 25 °C

Adhäsionsversagen auf Glas



+ 80 °C

Bild A.23

Typische Bruchbilder.

PK ID -20 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +25 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +80 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]
C2.007	5577,5	9,30	1,2	C2.001	4988,0	8,31	1,8	C2.013	1234,5	2,06	1,6
C2.008	3273,3	5,46	1,1	C2.002	5250,1	8,75	2,4	C2.014	1110,9	1,85	1,0
C2.009	3880,2	6,47	1,5	C2.003	3751,4	6,25	3,9	C2.015	1499,4	2,50	1,8
C2.010	1672,5	2,79	1,3	C2.004	4954,6	8,26	2,7	C2.016	2128,6	3,55	1,4
C2.011	2950,3	4,92	1,2	C2.005	4339,6	7,23	2,1	C2.017	1100,0	1,83	1,0
C2.012	4141,0	6,90	1,1	C2.006	4999,2	8,33	1,9	C2.018	730,7	1,22	0,7
Mittelw.	3582,5	5,97			4713,8	7,86			1300,6	2,17	
Stabw.	1305,6	2,18			560,1	0,93			475,5	0,79	

Tafel A.17

Einzelergbnisse.

Scotch-Weld™ DP 490 – DMA und Zugversuch

Bild A.24

Dynamisch-mechanische Analyse bei 1 Hz, Mittelwert aus drei Einzelmessungen (Speichermodul E' durchgezogen, Verlustfaktor $\tan \delta$ gestrichelt).

Glasübergänge
 $T_{g0}/T_g(\tan \delta_{\max})$ in °C

Messung 1:	44,9/78,4
Messung 2:	56,4/79,2
Messung 3:	45,1/81,5
Mittelwert:	18,3/79,7

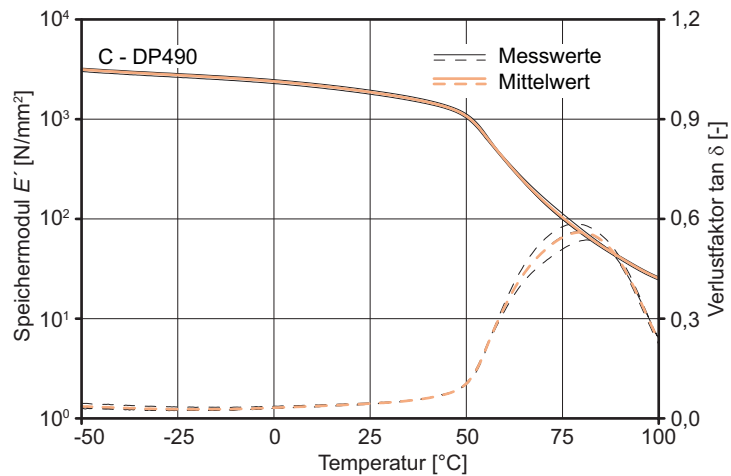


Bild A.25

Spannungs-Dehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch bei Variation von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit. Die Werte beziehen sich auf den Anfangsquerschnitt und die Ausgangsmesslänge.

Zugmodul → lineare Regression über alle Messpunkte zwischen 0,05 % und 0,25 % axialer Dehnung.

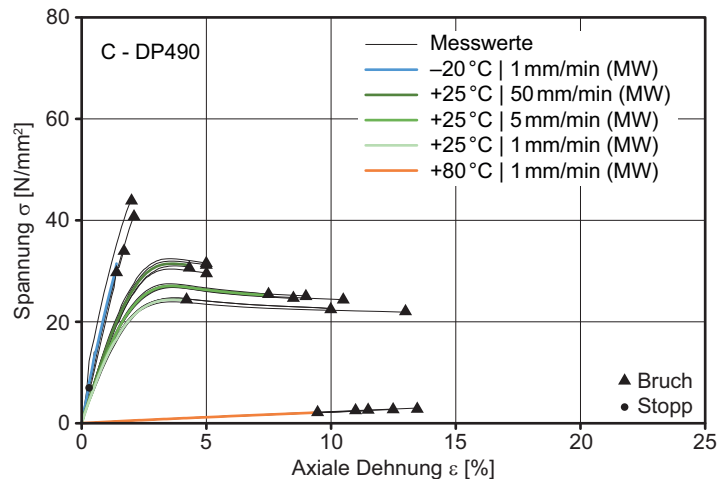
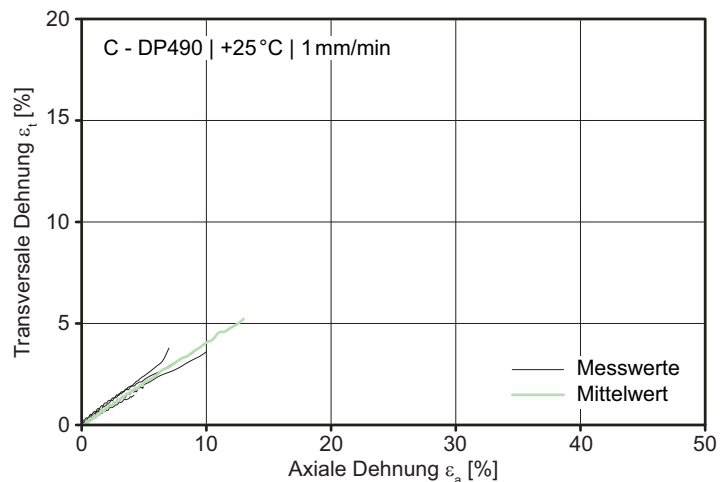


Bild A.26

Quer-Längsdehnungs-Beziehung im einaxialen Zugversuch.

Querdehnzahl → lineare Regression über alle Messpunkte der Quer-Längsdehnungsbeziehung zwischen 0,3 % und 1,5 % axialer Dehnung.



PK ID -20 °C	$E_{t,-20^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	PK ID +25 °C	$E_{t,+25^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]	μ	PK ID +80 °C	$E_{t,+80^{\circ}\text{C}}$ [N/mm ²]
C3-020	2005,1	C3-001	1284,9	0,38	C3-027	27,7
C3-021	2251,2	C3-002	1597,2	0,49	C3-028	31,7
C3-022	2288,1	C3-004	1429,1	0,48	C3-029	30,5
C3-024	3927,4	C3-005	1449,8	0,41	C3-030	26,7
C3-025	2247,6	C3-006	1451,1	0,41	C3-031	30,7
Mittelwert	2543,9		1442,4	0,43		29,5
Stabw.	781,5		110,8	0,05		2,2

Tafel A.18

Zugmodul E_t und Querdehnzahl μ für unterschiedliche Prüftemperaturen bestimmt nach DIN EN ISO 527-1.

PK ID 5 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	PK ID 50 mm/min	σ_b [N/mm ²]	δ_b [-]	σ_y [N/mm ²]	δ_y [-]
C3-007	27,6	0,036	C3-015	30,8	0,041	31,1	0,038
C3-008	26,8	0,036	C3-016	29,7	0,046	30,5	0,036
C3-010	26,9	0,036	C3-017	31,2	0,050	32,0	0,036
C3-014	27,3	0,036	C3-019	31,4	0,050	32,5	0,035
Mittelwert	27,1	0,036		30,8	0,046	31,5	0,036
Stabw.	0,3	0,000		0,8	0,004	0,9	0,001

Tafel A.19

Spannungs- und Dehnungskennwerte der Messkurven aus dem einaxialen Zugversuch.

Es sind nur die Messergebnisse von vier Prüfkörpern verwertbar, da die Proben Luftpinschlüsse aufwiesen oder nicht den Maßtoleranzvorgaben entsprachen.

Scotch-Weld™ DP 490 – Scherversuch



Bild A.27

Typische Bruchbilder.

PK ID -20 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +25 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]	PK ID +80 °C	F_{\max} [N]	τ_{\max} [N/mm ²]	Δx [mm]
C3.007	2066,8	3,44	1,3	C3.001	10,85	2,8	6509,4	C3.017	929,2	1,55	0,9
C3.008	3043,1	5,07	1,6	C3.002	10,75	3,4	6448,3	C3.018	892,2	1,49	0,9
C3.009	2520,6	4,20	1,9	C3.004	14,91	3,6	8947,6	C3.019	694,3	1,16	0,9
C3.014	2764,9	4,61	1,5	C3.005	10,09	2,7	6051,9	C3.020	590,3	0,98	0,6
C3.015	2789,9	4,65	1,6	C3.006	13,06	3,4	7836,2	C3.021	685,7	1,14	0,7
Mittelw.	2637,0	4,40			7158,7	11,93			758,3	1,26	
Stabw.	368,5	0,61			1205,2	2,01			145,5	0,24	

Tafel A.20

Einzelergebnisse.

Anhang B – Klebverbindungen im Labormaßstab

Scherversuche (Kurzzeitbelastung)

A – Ottocoll S660 **288**
Sperrholz/Vollholz
+25 °C

B – nolax C44.8505 **290**
Sperrholz/Vollholz
-20 °C/+25 °C/+80 °C/UV1/UV2/REI/FEU/TRO/SO2

C – Scotch-Weld DP 490 **308**
Sperrholz/Vollholz
-20 °C/+25 °C/+80 °C/UV1/UV2/REI/FEU/TRO/SO2

Zugversuche (Kurzzeitbelastung)

A – Ottocoll S660 **326**
Sperrholz/Vollholz
+25 °C

B – nolax C44.8505 **328**
Sperrholz/Vollholz
-20 °C/+25 °C/+80 °C/UV1/UV2/REI/FEU/TRO/SO2

C – Scotch-Weld DP 490 **346**
Sperrholz/Vollholz
-20 °C/+25 °C/+80 °C/UV1/UV2/REI/FEU/TRO/SO2

Übersicht Bruchmuster **364**
Scherversuche/Zugversuche

Kriechversuche

A – Ottocoll S660 **366**
Kriechkurven bei +23 °C/Restfestigkeit

B – nolax C44.8505 **368**
Kriechkurven bei +23 °C/Restfestigkeit

C – Scotch-Weld DP 490 **370**
Kriechkurven bei +23 °C/Restfestigkeit

A – Ottocoll S660 – Sperrholz
Scherversuch bei +25 °C (REF)

Bild B.1
 Schubspannungs-Gleitungs-
 Diagramm mit Markierung
 eines repräsentativen
 Prüfkörpers.

$G_{rep} = 0,43 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,10$

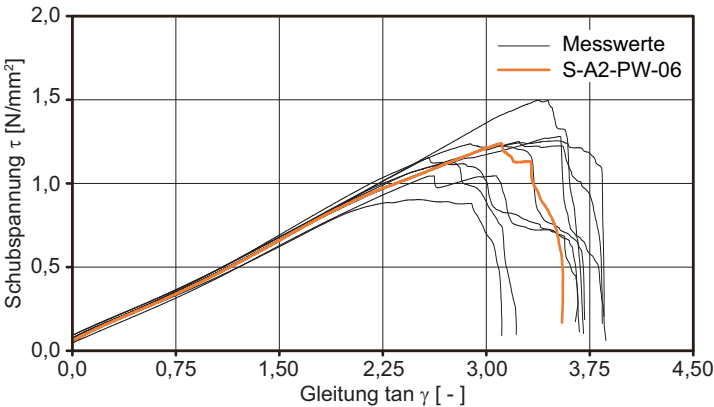
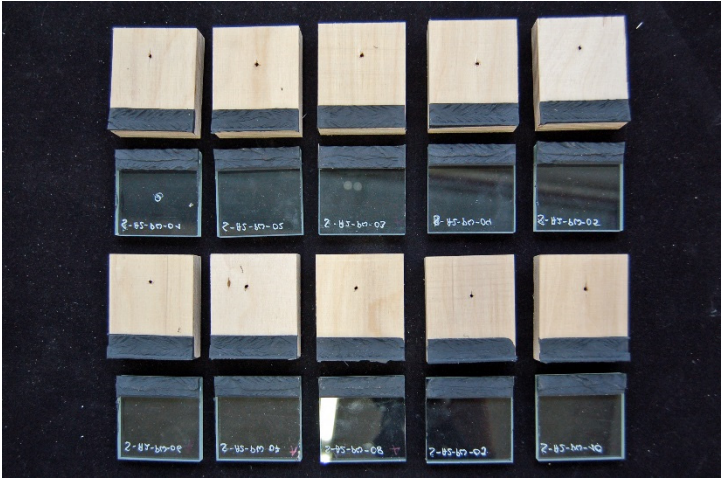


Bild B.2
 Bruchbilder.

Flächenanteile: [%]
 Substratbruch Glas 0,0
 Adhäsion Glas 0,0
 Kohäsion Klebfuge 100,0
 Adhäsion Holz 0,0
 Substratbruch Holz 0,0



Tafel B.1

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]		
S-A2-PW-01	898,4	10,1	12,0	50,0	3,0	1,50	3,38
S-A2-PW-02	748,3	8,1	12,1	50,0	2,8	1,24	2,89
S-A2-PW-03	712,9	7,5	12,4	50,0	2,9	1,15	2,58
S-A2-PW-04	777,9	10,4	12,2	50,0	2,9	1,28	3,54
S-A2-PW-05	720,2	8,6	12,9	50,0	3,1	1,12	2,83
S-A2-PW-06	785,4	9,2	12,7	50,0	3,0	1,24	3,12
S-A2-PW-07	797,7	9,6	12,8	50,0	3,0	1,25	3,24
S-A2-PW-08	784,2	10,1	12,5	50,0	2,9	1,25	3,51
S-A2-PW-09	677,4	9,1	13,0	50,0	3,0	1,04	3,07
S-A2-PW-10	562,4	7,3	12,5	50,0	2,9	0,90	2,52
Mittelwert X_{mean}	746,5	9,0	12,5	50,0	2,9	1,20	3,07
Standardabw. σ_X	88,3					0,16	
Exzentrizität $\sigma_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{U,5}$	561,2					0,87	

A – Ottocoll S660 – Vollholz
Scherversuch bei +25 °C (REF)

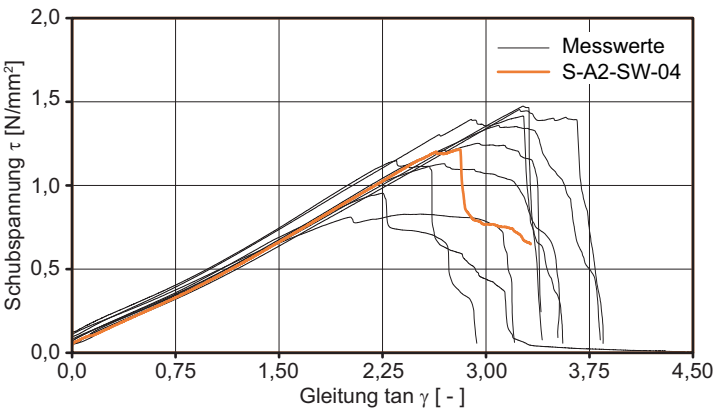


Bild B.3
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 0,39 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 bei $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,10$

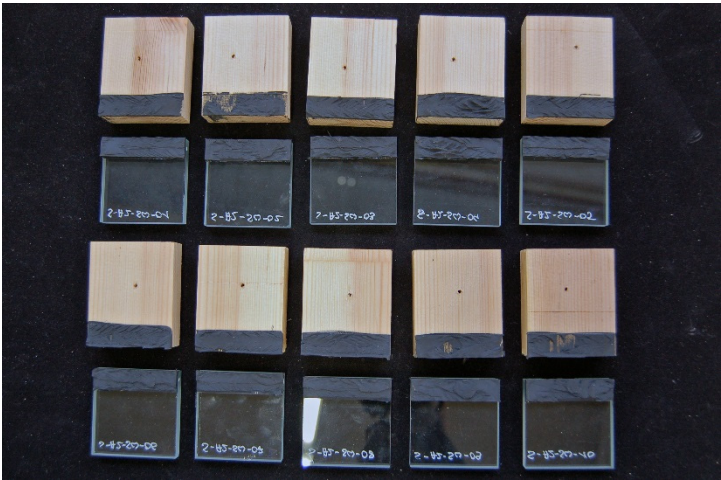


Bild B.4
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	94,5
Adhäsion Holz	5,5
Substratbruch Holz	0,0

Tafel B.2

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugegeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-A2-SW-01	867,3	9,7	11,8	50,0	3,0	1,47	3,27	
S-A2-SW-02	510,1	7,6	12,3	50,0	3,0	0,83	2,53	
S-A2-SW-03	859,1	10,5	12,2	50,0	3,2	1,41	3,27	
S-A2-SW-04	727,4	9,4	12,0	50,0	3,4	1,21	2,81	
S-A2-SW-05	861,9	9,6	11,9	50,0	3,0	1,45	3,25	
S-A2-SW-06	798,0	8,5	11,8	50,0	2,7	1,36	3,09	
S-A2-SW-07	747,9	9,5	12,0	50,0	3,2	1,25	2,94	
S-A2-SW-08	695,8	7,5	12,3	50,0	2,8	1,13	2,69	
S-A2-SW-09	580,7	6,6	12,2	50,0	2,9	0,95	2,25	
S-A2-SW-10	692,0	7,5	12,1	50,0	3,2	1,15	2,35	
Mittelwert X_{mean}	734,0	8,6	12,0	50,0	3,0	1,22	2,85	
Standardabw. σ_X	120,6					0,22		
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10		
5 %-Quantil $R_{u,5}$	480,7					0,77		

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Scherversuch bei -20 °C

Bild B.5

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 31,90 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

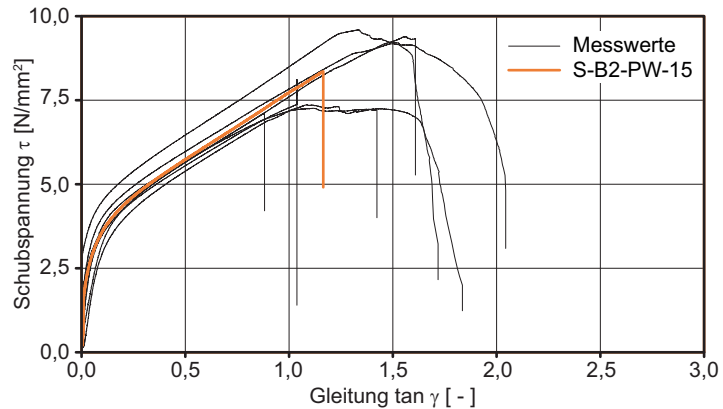
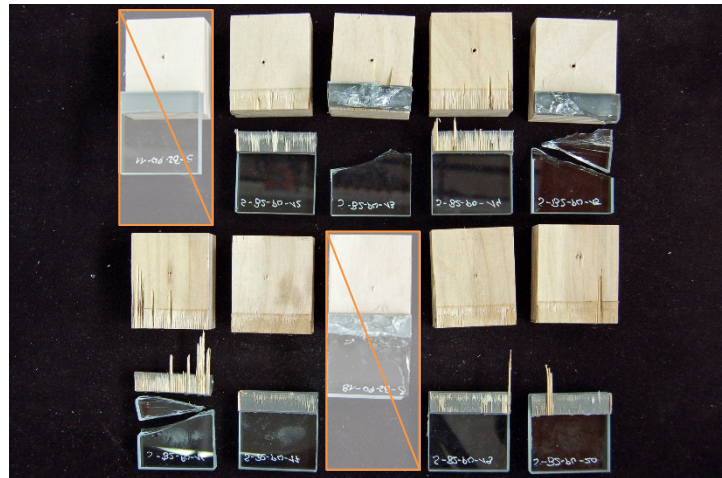


Bild B.6

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	12,5
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	41,9
Substratbruch Holz	45,6

Prüfkörper 1 und 8 werden nicht berücksichtigt. Weiterhin traten einige Glasbrüche nahezu gleichzeitig mit einem Bruch des Holzsubstrats auf (Prüfkörper 3 und 6). Die Flächenanteile werden der Bruchart Substratbruch Holz zugeordnet.



Tafel B.3

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{\max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-B2-PW-11	Versuchsabbruch durch Messprogramm → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt						
S-B2-PW-12	5988,0	3,6	12,5	50,0	2,7	9,60	1,34
S-B2-PW-13	4643,4	2,9	13,1	50,0	3,3	7,12	0,88
S-B2-PW-14	4586,8	3,6	12,5	50,0	3,3	7,37	1,09
S-B2-PW-15	5486,4	3,8	13,1	50,0	3,2	8,36	1,17
S-B2-PW-16	5698,3	4,6	12,1	50,0	2,9	9,40	1,55
S-B2-PW-17	4304,1	3,1	11,9	50,0	2,7	7,26	1,12
S-B2-PW-18	Glasbruch kurz nach Versuchsbeginn → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt						
S-B2-PW-19	5043,6	3,0	12,5	50,0	2,9	8,10	1,04
S-B2-PW-20	5738,2	4,3	12,5	50,0	2,8	9,18	1,50
Mittelwert X_{mean}	5186,1	3,6	12,5	50,0	3,0	8,30	1,21
Standardabw. σ_X	627,0					1,00	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,19					2,19	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	3812,9					6,10	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch bei -20 °C

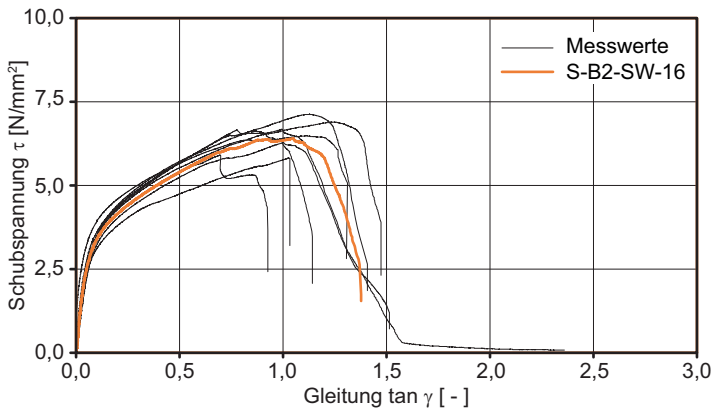


Bild B.7
Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

 $G_{rep} = 45,94 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

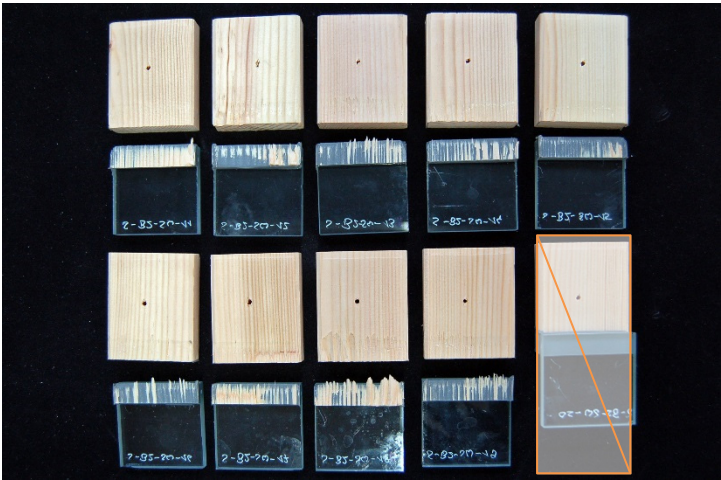


Bild B.8
Bruchbilder.

Flächenanteile: [%]
Substratbruch Glas 0,0
Adhäsion Glas 0,0
Kohäsion Klebfuge 0,0
Adhäsion Holz 47,2
Substratbruch Holz 52,8

Prüfkörper 10 wird nicht berücksichtigt.

Tafel B.4

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{\max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-B2-SW-11	3592,0	3,1	12,4	50,0	3,0	5,82	1,03
S-B2-SW-12	4455,7	2,9	12,5	50,0	2,6	7,13	1,13
S-B2-SW-13	3881,7	2,9	12,4	50,0	2,9	6,29	1,00
S-B2-SW-14	3911,0	2,7	12,3	50,0	2,9	6,39	0,94
S-B2-SW-15	4089,7	3,6	11,9	50,0	2,9	6,89	1,25
S-B2-SW-16	3794,6	3,2	11,9	50,0	3,1	6,40	1,05
S-B2-SW-17	3853,7	2,5	11,6	50,0	2,9	6,63	0,86
S-B2-SW-18	3428,9	2,0	11,6	50,0	2,9	5,90	0,69
S-B2-SW-19	3908,5	3,0	11,7	50,0	3,0	6,68	1,00
S-B2-SW-20	Versuchsabbruch durch Messprogramm → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt						
Mittelwert X_{mean}	3879,5	2,9	12,0	50,0	2,9	6,46	1,00
Standardabw. σ_X	289,7					0,43	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,14					2,14	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	3259,5					5,54	

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Scherversuch bei +25 °C (REF)

Bild B.9

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 9,10 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

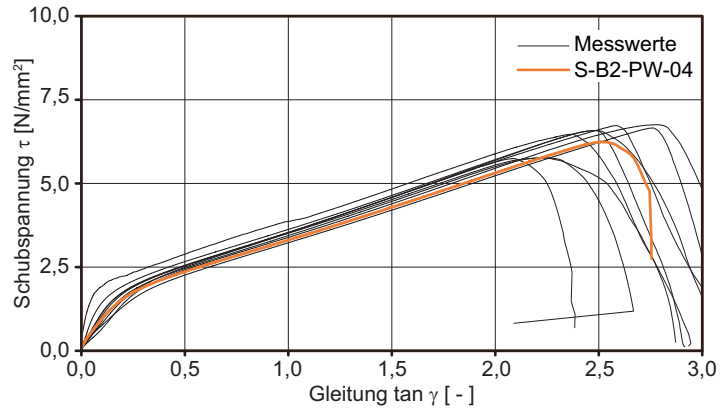


Bild B.10

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	95,5
Substratbruch Holz	4,5



Tafel B.5

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]		
S-B2-PW-01	3946,6	7,3	12,0	50,0	2,9	6,58	2,48
S-B2-PW-02	3518,0	6,6	12,2	50,0	3,0	5,77	2,23
S-B2-PW-03	3454,7	6,0	12,0	50,0	2,9	5,74	2,09
S-B2-PW-04	3858,0	7,3	12,4	50,0	2,9	6,24	2,52
S-B2-PW-05	4029,2	8,3	12,1	50,0	3,0	6,65	2,76
S-B2-PW-06	3999,1	7,5	11,9	50,0	2,9	6,73	2,59
S-B2-PW-07	3516,0	6,3	12,2	50,0	2,8	5,75	2,23
S-B2-PW-08	4088,6	7,8	12,1	50,0	2,8	6,75	2,78
S-B2-PW-09	3975,8	6,7	12,1	50,0	2,7	6,58	2,48
S-B2-PW-10	3847,8	7,0	11,9	50,0	3,0	6,47	2,37
Mittelwert X_{mean}	3823,4	7,1	12,1	50,0	2,9	6,32	2,45
Standardabw. σ_X	237,4					0,42	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	3324,8					5,44	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch bei +25 °C (REF)

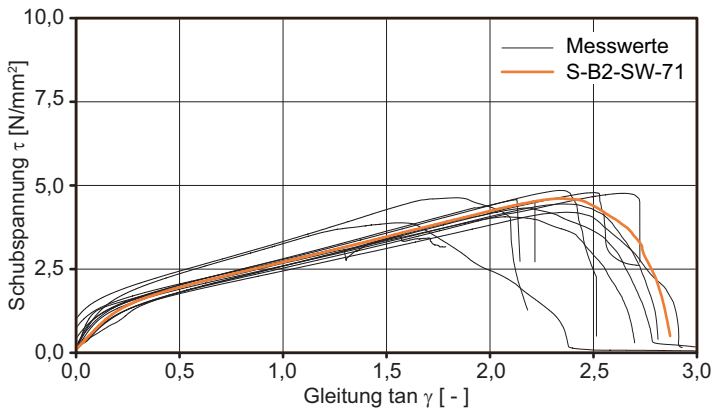


Bild B.11
Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 6,58 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

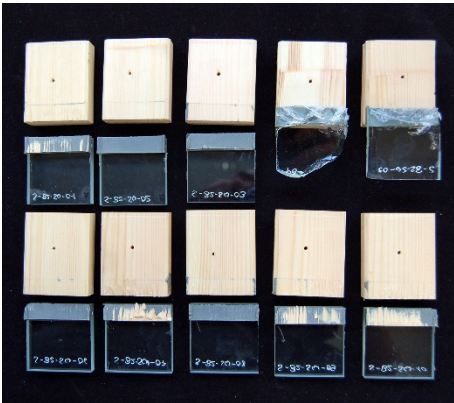


Bild B.12
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	15,4
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	58,5
Substratbruch Holz	26,2

Drei Zusatzversuche.

Tafel B.6

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-SW-01	2818,1	5,9	12,2	50,0	3,2		4,63	1,84
S-B2-SW-02	2389,2	4,7	12,3	50,0	3,0		3,88	1,57
S-B2-SW-03	2525,5	7,0	12,1	50,0	3,0		4,19	2,37
S-B2-SW-04	2764,7	6,4	12,3	50,0	2,9		4,51	2,22
S-B2-SW-05	2176,4	4,9	12,5	50,0	3,1		3,49	1,57
S-B2-SW-06	2430,0	5,7	12,0	50,0	2,8		4,06	2,07
S-B2-SW-07	2862,9	6,7	11,8	50,0	2,9		4,84	2,34
S-B2-SW-08	2543,0	7,1	11,8	50,0	3,2		4,32	2,19
S-B2-SW-09	2803,9	7,3	11,7	50,0	2,9		4,78	2,51
S-B2-SW-10	2752,8	7,0	12,1	50,0	3,3		4,57	2,13
S-B2-SW-71	2733,3	6,3	11,9	50,0	2,7		4,61	2,35
S-B2-SW-72	2876,5	7,9	12,1	50,0	3,0		4,76	2,65
S-B2-SW-73	2736,7	6,7	12,3	50,0	2,8		4,44	2,36
Mittelwert X_{mean}	2647,1	6,4	12,1	50,0	3,0		4,39	2,17
Standardabw. σ_X	214,9						0,40	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,03						2,03	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	2210,9						3,59	

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Scherversuch bei +80 °C

Bild B.13

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 1,34 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

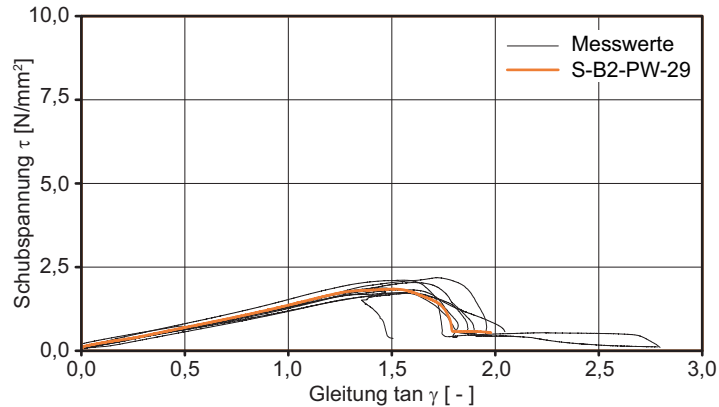


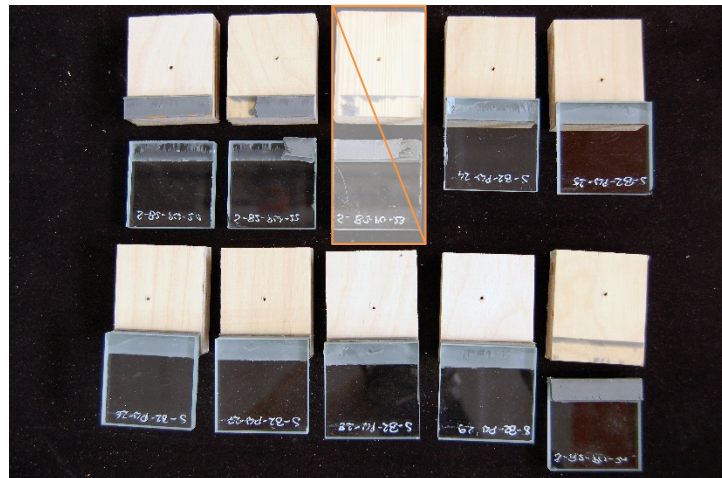
Bild B.14

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	1,1
Adhäsion Glas	27,8
Kohäsion Klebfuge	33,9
Adhäsion Holz	37,2
Substratbruch Holz	0,0

Kohäsive Brüche oberflächennah.

Prüfkörper 3 wird nicht berücksichtigt.



Tafel B.7

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]		
S-B2-PW-21	1055,4	4,8	12,4	50,0	3,0	1,70	1,58
S-B2-PW-22	1069,2	4,8	12,5	50,0	3,1	1,72	1,54
S-B2-PW-23	Probe vertauscht, falsches Holzmaterial → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt						
S-B2-PW-24	1195,2	4,3	12,8	50,0	3,0	1,86	1,44
S-B2-PW-25	1142,0	4,5	12,6	50,0	2,9	1,81	1,56
S-B2-PW-26	1062,9	4,6	12,3	50,0	2,9	1,73	1,58
S-B2-PW-27	1325,5	5,0	12,2	50,0	2,9	2,17	1,72
S-B2-PW-28	1257,1	4,7	12,4	50,0	2,9	2,03	1,61
S-B3-PW-29	1074,9	4,9	11,8	50,0	3,3	1,83	1,51
S-B3-PW-30	1308,0	4,6	12,5	50,0	3,0	2,10	1,56
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1165,6	4,7	12,4	50,0	3,0	1,88	1,57
Standardabw. σ_X	109,5					0,17	
Exzentrizität $\tau_{0\beta}$	2,14					2,14	
5 %-Quantil $R_{0,5}$	931,3					1,51	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch bei +80°C

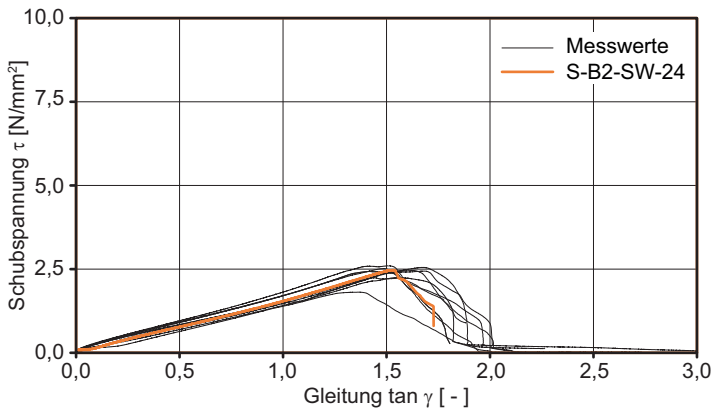


Bild B.15
Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 0,60 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

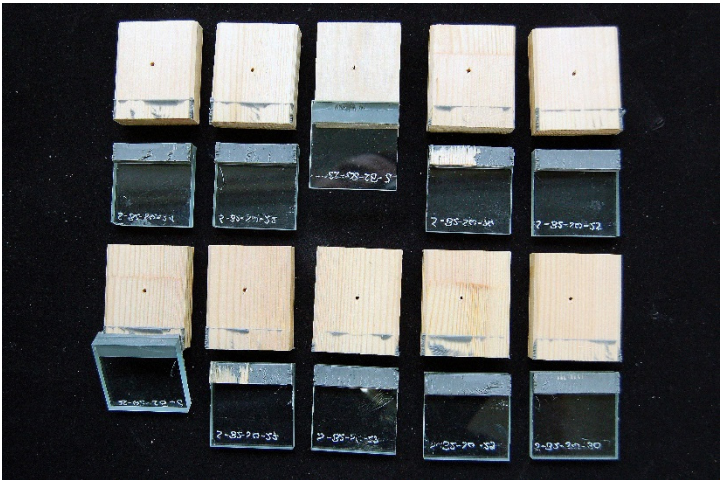


Bild B.16
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	3,5
Kohäsion Klebfuge	10,0
Adhäsion Holz	78,5
Substratbruch Holz	8,0

Tafel B.8

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-SW-21	1439,3	5,1	11,9	50,0	3,1		2,43	1,69
S-B2-SW-22	1489,8	4,0	12,3	50,0	2,8		2,42	1,42
S-B2-SW-23	1329,5	4,5	11,9	50,0	3,2		2,23	1,44
S-B2-SW-24	1479,8	4,5	12,1	50,0	2,9		2,46	1,53
S-B2-SW-25	1466,2	4,4	12,0	50,0	2,7		2,45	1,63
S-B2-SW-26	1516,6	4,4	12,1	50,0	3,0		2,51	1,49
S-B2-SW-27	1378,0	4,6	12,3	50,0	2,9		2,24	1,55
S-B2-SW-28	1061,9	4,1	11,8	50,0	3,0		1,80	1,37
S-B2-SW-29	1487,9	5,0	11,7	50,0	3,0		2,54	1,69
S-B2-SW-30	1585,8	4,34	12,3	50,0	2,9		2,59	1,51
Mittelwert X_{mean}	1423,5	4,5	12,0	50,0	2,9		2,37	1,53
Standardabw. σ_x	145,5						0,23	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10						2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1118,0						1,88	

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Scherversuch nach UV-Bestrahlung für 500 h (UV1)

Bild B.17

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 63,30 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,025$

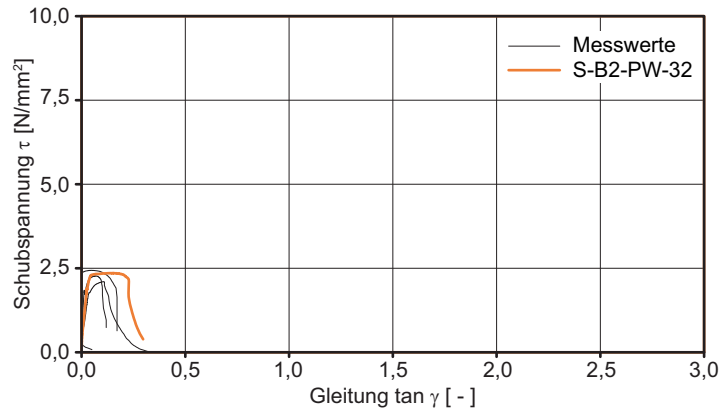
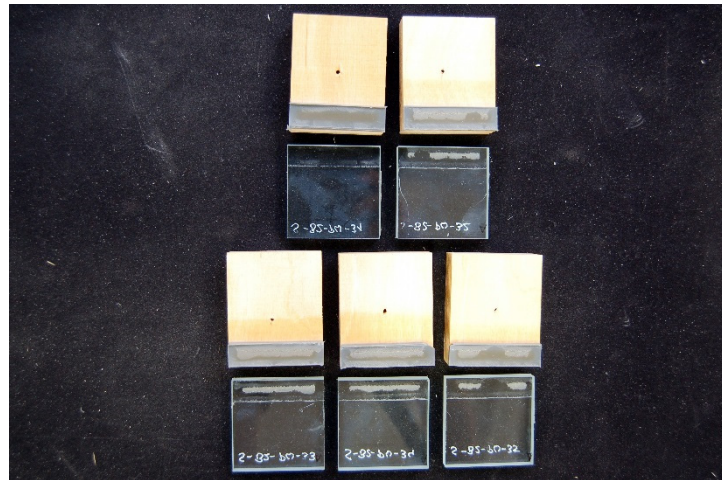


Bild B.18

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	84,0
Kohäsion Klebfuge	16,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Die Kohäsionsbrüche treten oberflächennah (Glas) auf.



Tafel B.9

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-PW-31	1222,1	-0,1	12,8	50,0	3,0		1,91	-0,03
S-B2-PW-32	1453,3	0,4	12,4	50,0	2,9		2,34	0,14
S-B2-PW-33	1327,6	0,3	12,7	50,0	3,0		2,09	0,11
S-B2-PW-34	1490,6	0,2	12,3	50,0	3,3		2,43	0,05
S-B2-PW-35	1366,7	0,2	12,1	50,0	3,2		2,26	0,07
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1372,1	0,2	12,5	50,0	3,1		2,21	0,07
Standardabw. σ_X	106,2						0,21	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1110,7						1,69	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch nach UV-Bestrahlung für 500 h (UV1)

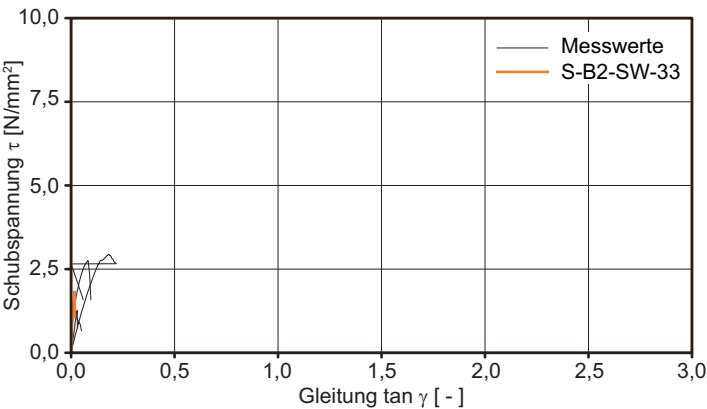


Bild B.19
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 77,54 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,025$

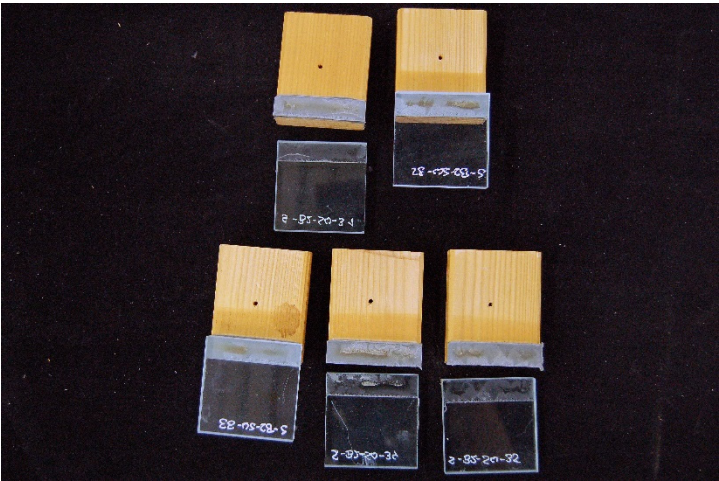


Bild B.20
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	76,0
Kohäsion Klebfuge	24,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Die Kohäsionsbrüche treten oberflächennah (Glas) auf.

Tafel B.10

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-SW-31	1651,3	0,3	12,0	50,0	3,2		2,75	0,08
S-B2-SW-32	821,9	0,0	12,1	50,0	2,9		1,36	0,01
S-B2-SW-33	1088,4	0,1	12,0	50,0	2,9		1,81	0,02
S-B2-SW-34	1825,9	0,5	12,4	50,0	2,9		2,94	0,18
S-B2-SW-35	754,5	0,1	12,1	50,0	2,8		1,25	0,03
Mittelwert X_{mean}	1228,4	0,2	12,1	50,0	3,0		2,02	0,06
Standardabw. σ_x	486,1						0,78	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	32,5						0,10	

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Scherversuch nach UV-Bestrahlung für 1000 h (UV2)

Bild B.21

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 32,96 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

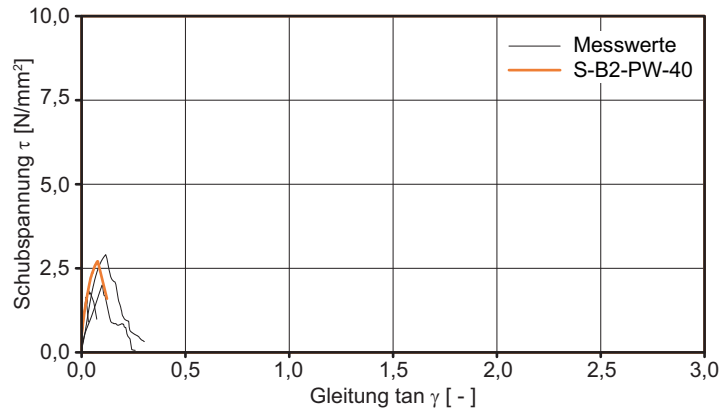
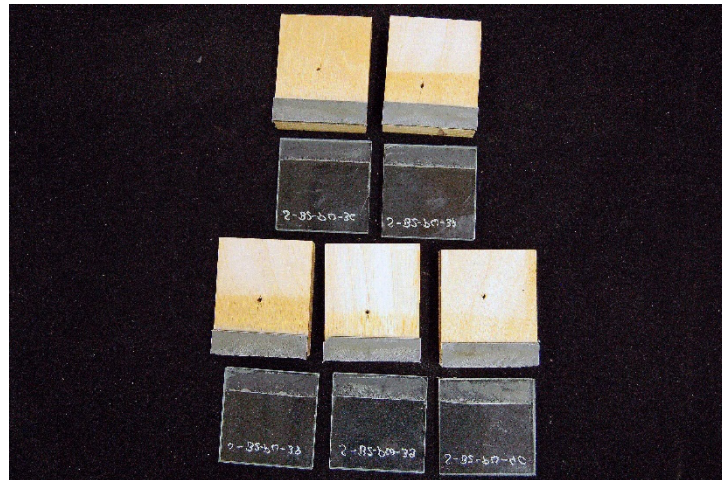


Bild B.22

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	50,0
Kohäsion Klebfuge	50,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Die Kohäsionsbrüche treten oberflächennah (Glas) auf.



Tafel B.11

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-PW-36	1028,4	0,1	12,4	50,0	3,0		1,66	0,02
S-B2-PW-37	1113,5	0,1	12,0	50,0	3,0		1,86	0,03
S-B2-PW-38	1723,5	0,3	11,9	50,0	3,0		2,90	0,12
S-B2-PW-39	1184,9	0,3	11,9	50,0	3,0		1,99	0,10
S-B2-PW-40	1581,1	0,2	11,7	50,0	2,8		2,70	0,08
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1326,3	0,2	12,0	50,0	3,0		2,22	0,07
Standardabw. σ_X	306,9						0,54	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	571,4						0,88	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch nach UV-Bestrahlung für 1000 h (UV2)

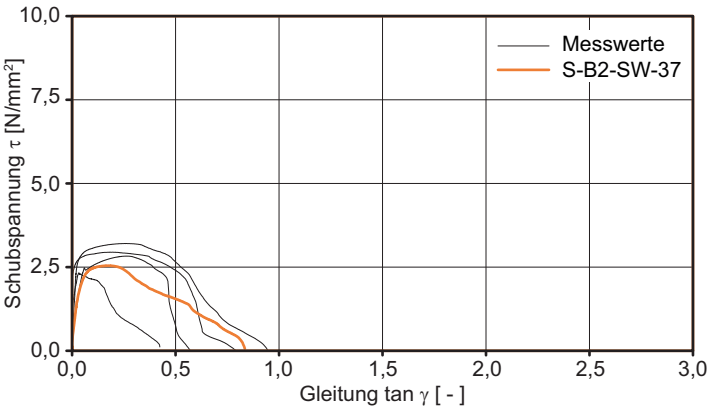


Bild B.23
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 31,86 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

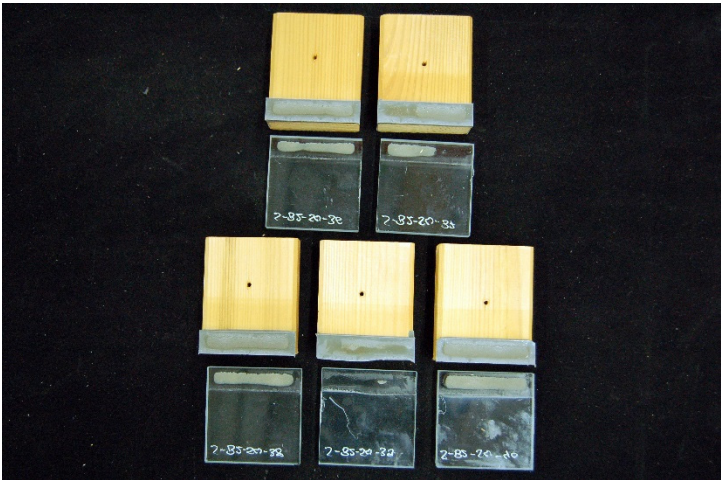


Bild B.24
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	61,0
Kohäsion Klebfuge	39,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Die Kohäsionsbrüche treten oberflächennah (Glas) auf.

Tafel B.12

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-SW-36	1689,9	0,8	12,0	50,0	3,0		2,82	0,26
S-B2-SW-37	1572,5	0,5	12,4	50,0	3,0		2,53	0,18
S-B2-SW-38	1797,1	0,6	12,2	50,0	3,0		2,94	0,19
S-B2-SW-39	1428,9	0,1	12,3	50,0	3,0		2,32	0,03
S-B2-SW-40	1992,6	0,7	12,5	50,0	2,8		3,20	0,25
Mittelwert X_{mean}	1696,2	0,6	12,3	50,0	3,0		2,76	0,18
Standardabw. σ_x	214,9						0,34	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1167,4						1,91	

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Scherversuch nach Reinigungsmittellagerung (REI)

Bild B.25

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 23,34 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

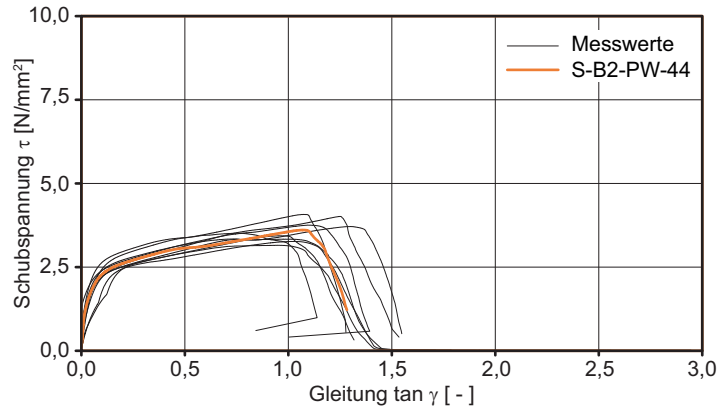


Bild B.26

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	99,5
Substratbruch Holz	0,5



Tafel B.13

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-PW-41	2023,8	2,2	12,1	50,0	3,0		3,33	0,74
S-B2-PW-42	1882,3	2,8	12,0	50,0	3,0		3,14	0,94
S-B2-PW-43	2225,2	3,3	11,9	50,0	3,0		3,75	1,10
S-B2-PW-44	2171,1	3,3	12,1	50,0	3,1		3,60	1,07
S-B2-PW-45	1988,7	3,1	12,2	50,0	3,0		3,26	1,02
S-B2-PW-46	2200,4	3,8	11,9	50,0	3,0		3,70	1,30
S-B2-PW-47	2369,6	3,7	11,8	50,0	2,9		4,01	1,25
S-B2-PW-48	2010,7	2,8	11,7	50,0	3,0		3,43	0,96
S-B2-PW-49	2114,0	2,2	12,1	50,0	3,0		3,51	0,76
S-B2-PW-50	2403,6	3,3	11,8	50,0	3,1		4,07	1,07
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2138,9	3,1	12,0	50,0	3,0		3,58	1,02
Standardabw. σ_X	168,1						0,31	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10						2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1786,0						2,94	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch nach Reinigungsmittellagerung (REI)

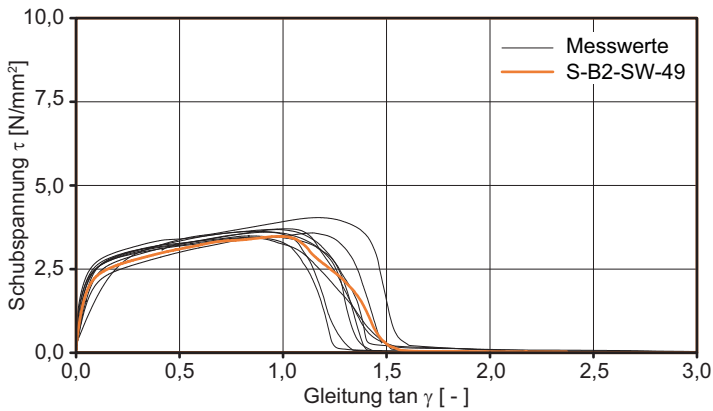


Bild B.27
Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 22,54 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$



Bild B.28
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	100,0
Substratbruch Holz	0,0

Tafel B.14

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-B2-SW-41	2179,7	3,3	12,2	50,0	2,9	3,57	1,14
S-B2-SW-42	2138,1	2,6	12,4	50,0	3,1	3,45	0,85
S-B2-SW-43	2240,1	2,6	12,1	50,0	2,5	3,70	1,02
S-B2-SW-44	2515,5	3,0	12,5	50,0	2,6	4,03	1,18
S-B2-SW-45	2183,9	2,5	12,1	50,0	2,8	3,62	0,89
S-B2-SW-46	2165,2	2,6	12,1	50,0	2,8	3,59	0,93
S-B2-SW-47	2155,3	2,4	12,4	50,0	2,9	3,48	0,83
S-B2-SW-48	2305,6	2,8	12,6	50,0	2,9	3,67	0,97
S-B2-SW-49	2085,4	2,9	12,0	50,0	3,0	3,47	0,98
S-B2-SW-50	2112,6	2,5	12,3	50,0	2,9	3,42	0,86
Mittelwert X_{mean}	2208,1	2,7	12,3	50,0	2,8	3,60	0,96
Standardabw. σ_X	124,8					0,18	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1946,1					3,23	

B – nolax C44.8505 – Sperrholz
Scherversuch nach Befeuchtung +20 °C | 90 % rF (FEU)

Bild B.29
 Schubspannungs-Gleitungs-
 Diagramm mit Markierung
 eines repräsentativen
 Prüfkörpers.

$G_{rep} = 13,15 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

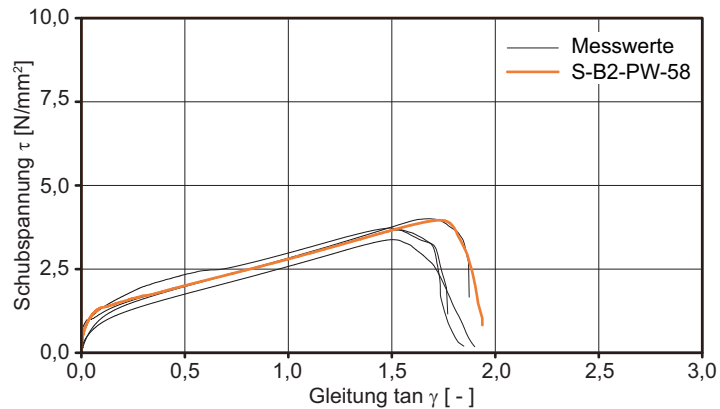
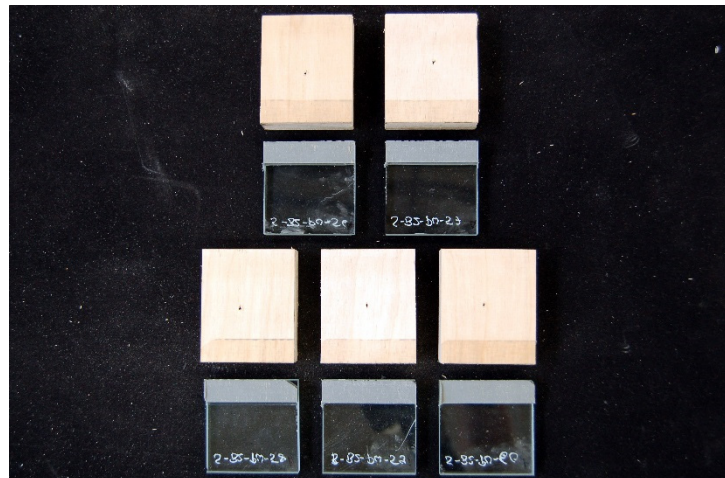


Bild B.30
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	100,0
Substratbruch Holz	0,0



Tafel B.15

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]		
S-B2-PW-56	2450,6	4,9	12,3	50,0	2,9	4,00	1,68
S-B2-PW-57	2213,3	4,4	12,1	50,0	2,8	3,66	1,54
S-B2-PW-58	2357,3	4,9	11,9	50,0	2,8	3,95	1,72
S-B2-PW-59	2246,6	4,2	12,1	50,0	2,8	3,72	1,50
S-B2-PW-60	2056,9	4,4	12,2	50,0	2,9	3,37	1,51
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2264,9	4,5	12,1	50,0	2,9	3,74	1,59
Standardabw. σ_x	149,4					0,25	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1897,5					3,12	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch nach Befeuchtung +20 °C | 90 % rF (FEU)

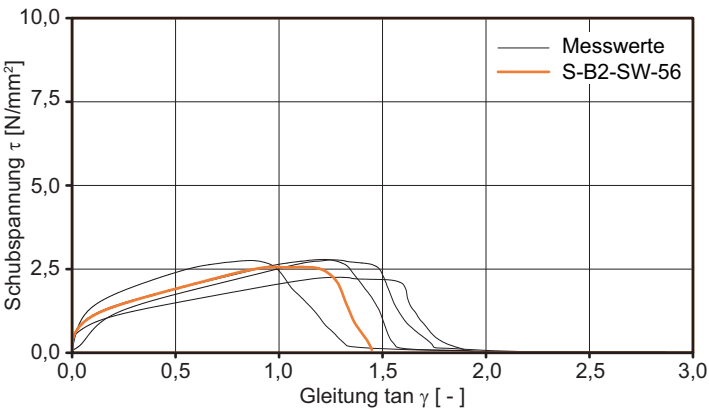


Bild B.31
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 8,76 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

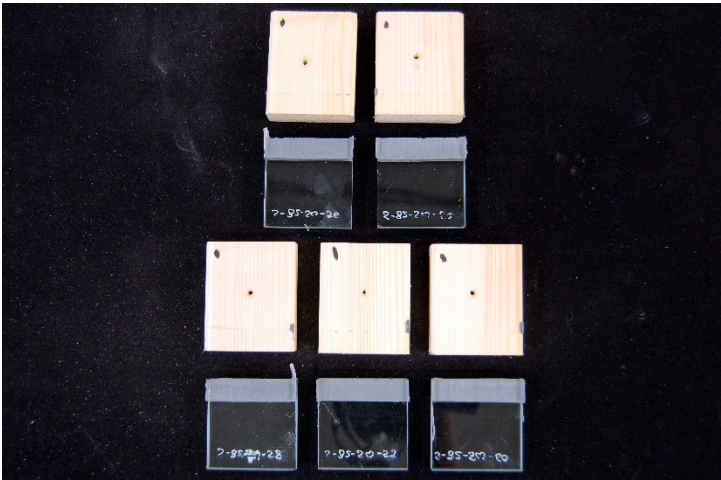


Bild B.32
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	100,0
Substratbruch Holz	0,0

Tafel B.16

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-SW-56	1492,7	3,1	11,7	50,0	2,8		2,55	1,11
S-B2-SW-57	1384,7	3,8	12,3	50,0	2,9		2,25	1,29
S-B2-SW-58	1704,4	2,4	12,4	50,0	2,8		2,75	0,87
S-B2-SW-59	1694,3	3,7	12,2	50,0	3,1		2,78	1,21
S-B2-SW-60	1709,0	3,9	12,4	50,0	3,1		2,77	1,26
Mittelwert X_{mean}	1597,0	3,4	12,2	50,0	2,9		2,62	1,15
Standardabw. σ_x	149,6						0,23	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1229,1						2,06	

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Scherversuch nach Trocknung +20 °C | < 30 % rF (TRO)

Bild B.33

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 18,68 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

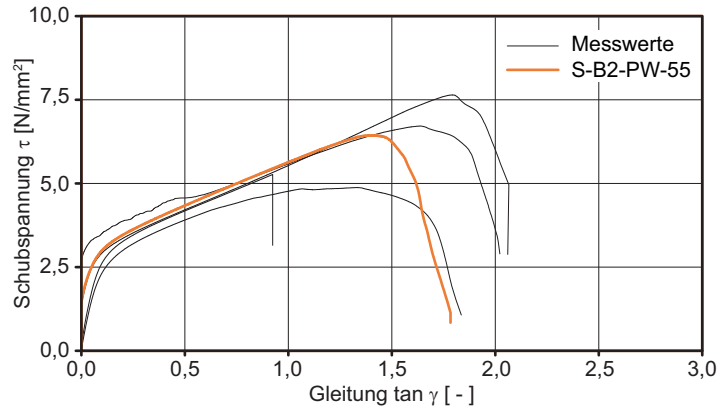
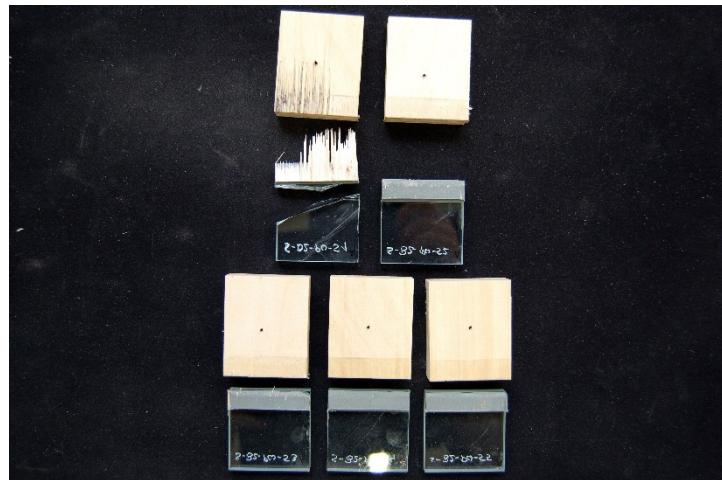


Bild B.34

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	79,0
Substratbruch Holz	21,0

Das Holz bricht bei Prüfkörper 1 zuerst. Die Probe wird Substratbruch Holz zugeordnet.



Tafel B.17

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]		
S-B2-PW-51	3177,3	2,6	12,1	50,0	2,8	5,26	0,92
S-B2-PW-52	4064,1	4,6	12,1	50,0	2,8	6,71	1,64
S-B2-PW-53	2975,5	4,1	12,2	50,0	3,1	4,87	1,33
S-B2-PW-54	4619,0	5,5	12,1	50,0	3,1	7,64	1,79
S-B2-PW-55	3954,1	4,1	12,3	50,0	2,9	6,43	1,40
Mittelwert \bar{X}_{mean}	3758,0	4,2	12,2	50,0	2,9	6,18	1,42
Standardabw. σ_X	675,1					1,12	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	2097,3					3,42	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch nach Trocknung +20 °C | < 30 % rF (TRO)

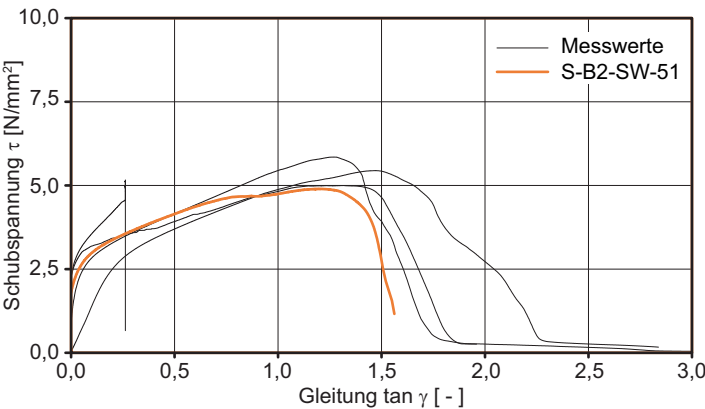


Bild B.35
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 14,27 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

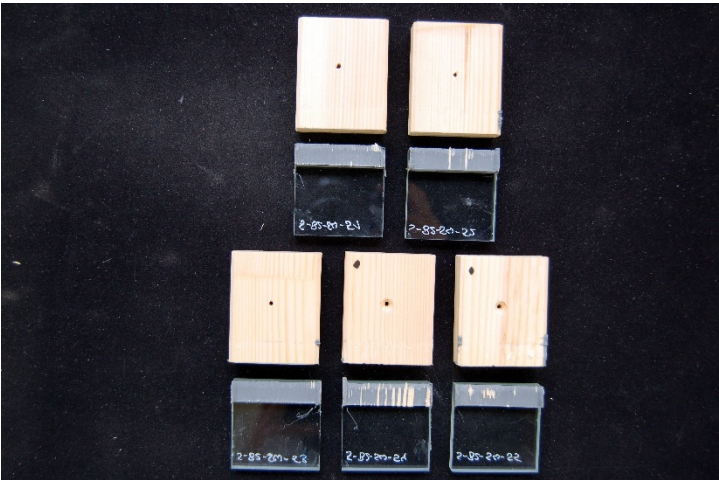


Bild B.36
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	93,0
Substratbruch Holz	7,0

Tafel B.18

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-SW-51	2970,2	3,4	12,2	50,0	2,9		4,89	1,20
S-B2-SW-52	3649,1	3,7	12,5	50,0	2,9		5,84	1,27
S-B2-SW-53	3034,9	3,9	12,2	50,0	2,9		4,99	1,32
S-B2-SW-54	3234,7	0,7	12,6	50,0	2,7		5,15	0,26
S-B2-SW-55	3351,4	4,2	12,3	50,0	2,9		5,44	1,46
Mittelwert X_{mean}	3248,1	3,2	12,3	50,0	2,9		5,26	1,10
Standardabw. σ_x	271,3						0,38	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	2580,7						4,32	

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Scherversuch nach SO₂-Lagerung (SO₂)

Bild B.37

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 18,76 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

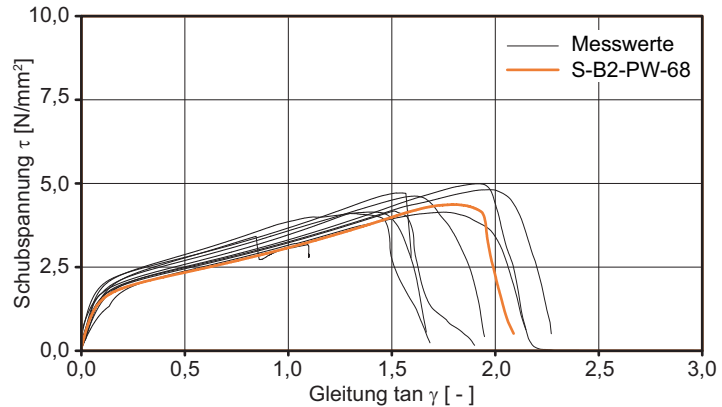
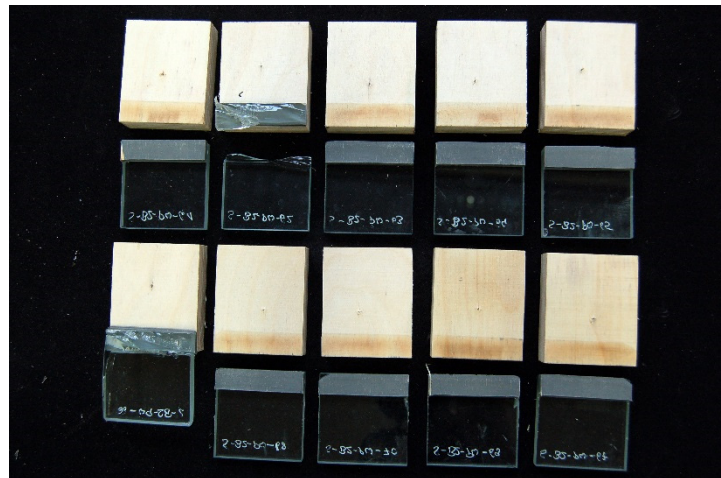


Bild B.38

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	20,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	80,0
Substratbruch Holz	0,0



Tafel B.19

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-PW-61	2914,1	5,7	12,1	50,0	2,9		4,80	1,98
S-B2-PW-62	2864,4	4,3	12,2	50,0	2,8		4,71	1,55
S-B2-PW-63	2577,3	4,7	12,5	50,0	3,4		4,14	1,40
S-B2-PW-64	2541,9	4,5	12,4	50,0	3,4		4,09	1,30
S-B2-PW-65	2492,8	4,5	12,0	50,0	3,0		4,17	1,52
S-B2-PW-66	2104,7	2,7	12,4	50,0	3,2		3,41	0,85
S-B2-PW-67	2722,9	4,9	11,8	50,0	3,0		4,62	1,61
S-B2-PW-68	2682,4	5,5	12,3	50,0	3,1		4,36	1,80
S-B2-PW-69	2463,8	5,1	11,9	50,0	2,9		4,13	1,75
S-B2-PW-70	3010,2	5,5	12,1	50,0	2,9		4,98	1,91
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2637,4	4,7	12,2	50,0	2,9		4,34	1,57
Standardabw. σ_X	263,3						0,46	
Exzentrizität $\tau_{0\beta}$	2,10						2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	2084,6						3,38	

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Scherversuch nach SO₂-Lagerung (SO₂)

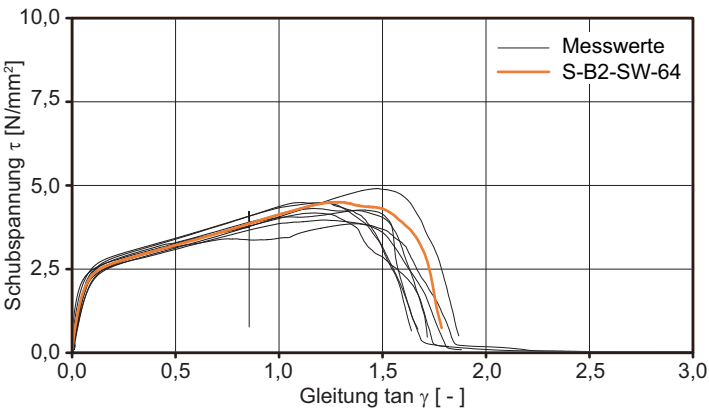


Bild B.39
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 29,96 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich $0,01 \leq \tan \gamma \leq 0,05$

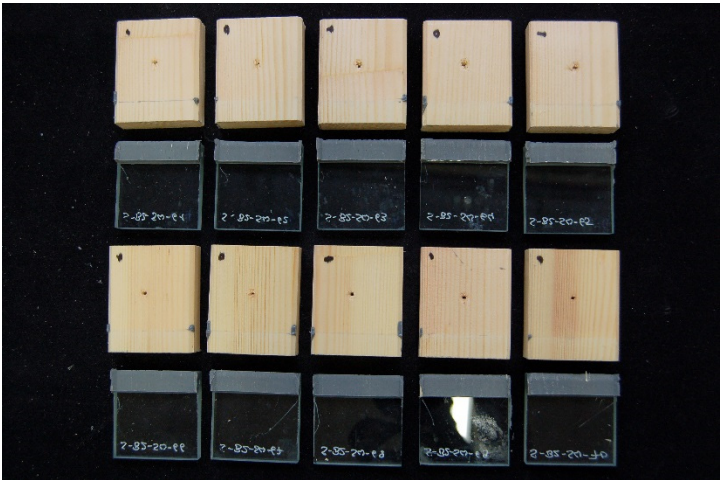


Bild B.40
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	100,0
Substratbruch Holz	0,0

Tafel B.20

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-B2-SW-61	2898,3	4,3	11,8	50,0	2,9		4,90	1,48
S-B2-SW-62	2597,1	2,7	12,4	50,0	3,2		4,20	0,86
S-B2-SW-63	2582,1	3,2	12,0	50,0	2,8		4,30	1,16
S-B2-SW-64	2726,5	3,7	12,1	50,0	2,9		4,49	1,29
S-B2-SW-65	2429,0	3,6	12,3	50,0	3,0		3,96	1,21
S-B2-SW-66	2761,8	3,0	12,4	50,0	2,5		4,47	1,19
S-B2-SW-67	2512,5	3,5	12,1	50,0	3,0		4,17	1,17
S-B2-SW-68	2731,3	2,7	12,2	50,0	2,4		4,48	1,10
S-B2-SW-69	2650,9	3,7	12,5	50,0	2,7		4,26	1,40
S-B2-SW-70	2379,4	4,2	12,4	50,0	3,0		3,85	1,37
Mittelwert X_{mean}	2626,9	3,5	12,2	50,0	2,8		4,31	1,22
Standardabw. σ_x	159,7						0,30	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10						2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	2291,4						3,68	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Scherversuch bei -20 °C

Bild B.41

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 119,54 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

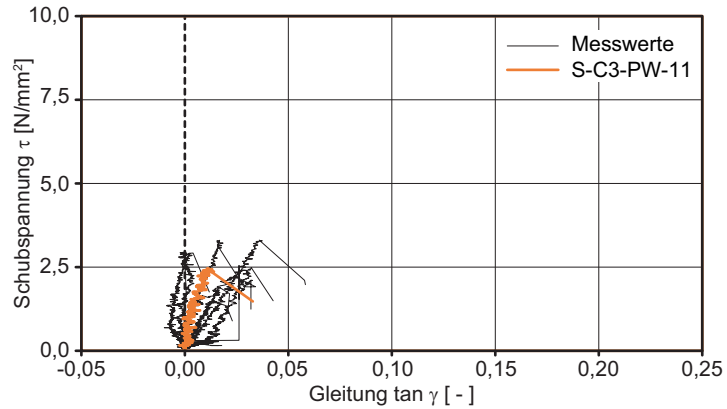
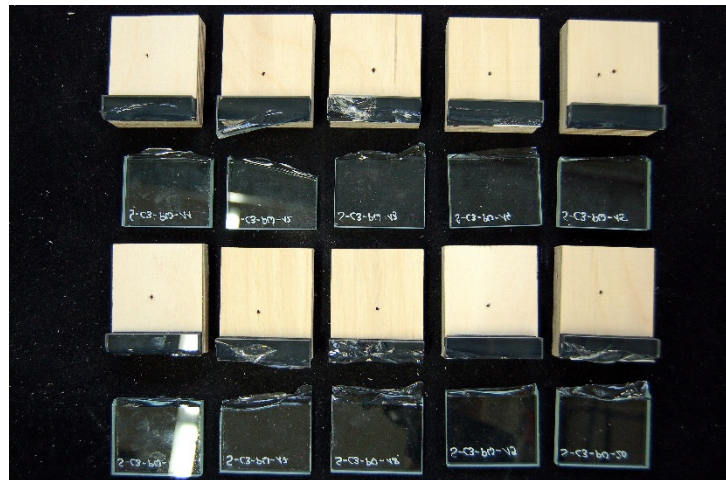


Bild B.42

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	100,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0



Tafel B.21

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-C3-PW-11	1508,2	0,0	12,3	50,0	2,9		2,44	0,01
S-C3-PW-12	1800,7	0,0	12,4	50,0	2,8		2,91	0,00
S-C3-PW-13	1847,0	0,0	12,6	50,0	2,9		2,94	0,00
S-C3-PW-14	1582,9	0,1	12,5	50,0	2,9		2,54	0,03
S-C3-PW-15	1155,9	0,0	12,3	50,0	2,9		1,88	0,02
S-C3-PW-16	1425,8	0,1	11,5	50,0	2,9		2,48	0,03
S-C3-PW-17	2003,8	0,0	12,2	50,0	3,0		3,29	0,02
S-C3-PW-18	1306,1	0,1	11,9	50,0	2,9		2,20	0,02
S-C3-PW-19	911,1	0,0	12,4	50,0	3,0		1,47	0,01
S-C3-PW-20	2089,9	0,1	12,7	50,0	3,1		3,30	0,04
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1563,1	0,1	12,3	50,0	2,9		2,55	0,02
Standardabw. σ_X	378,3						0,59	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10						2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	768,7						1,31	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch bei -20 °C

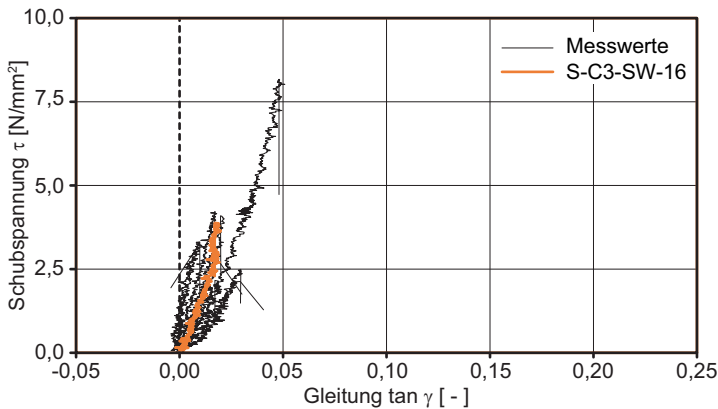


Bild B.43
Schubspannungs-Gleitungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

$G_{rep} = 177,97 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

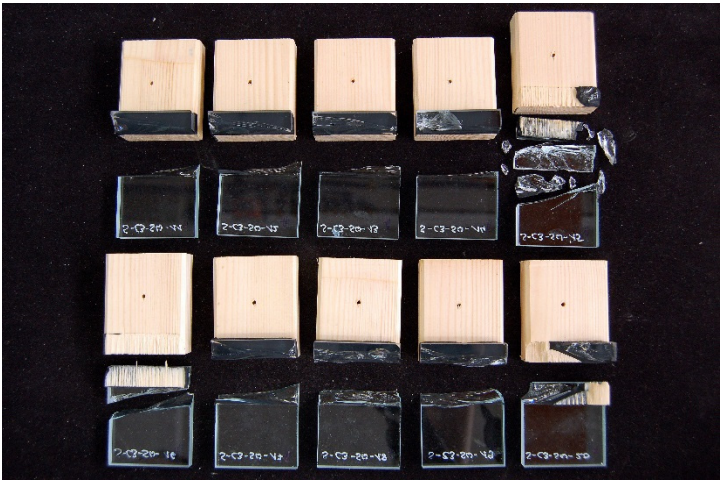


Bild B.44
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	88,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	2,0
Substratbruch Holz	10,0

Tafel B.22

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-C3-SW-11	1310,8	0,0	12,2	50,0	2,9	2,15	0,02
S-C3-SW-12	1306,3	0,1	12,3	50,0	2,8	2,12	0,03
S-C3-SW-13	2478,9	0,1	11,8	50,0	3,0	4,21	0,02
S-C3-SW-14	1850,3	0,0	12,5	50,0	3,0	2,96	0,02
S-C3-SW-15	5021,4	0,1	12,3	50,0	2,9	8,17	0,05
S-C3-SW-16	2456,9	0,0	12,7	50,0	2,7	3,87	0,02
S-C3-SW-17	1466,9	0,1	11,8	50,0	2,8	2,48	0,03
S-C3-SW-18	2438,4	0,1	11,9	50,0	3,2	4,08	0,02
S-C3-SW-19	1980,9	0,0	12,0	50,0	3,1	3,30	0,01
S-C3-SW-20	2068,2	0,0	12,7	50,0	2,9	3,26	0,01
Mittelwert X_{mean}	2237,9	0,1	12,2	50,0	2,9	3,66	0,02
Standardabw. σ_X	1078,1					1,75	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,19					2,19	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	-123,2					-0,18	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Scherversuch bei +25 °C (REF)

Bild B.45

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 152,58 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

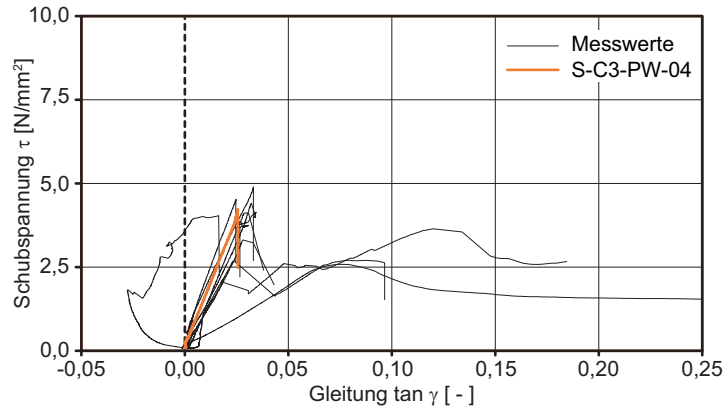
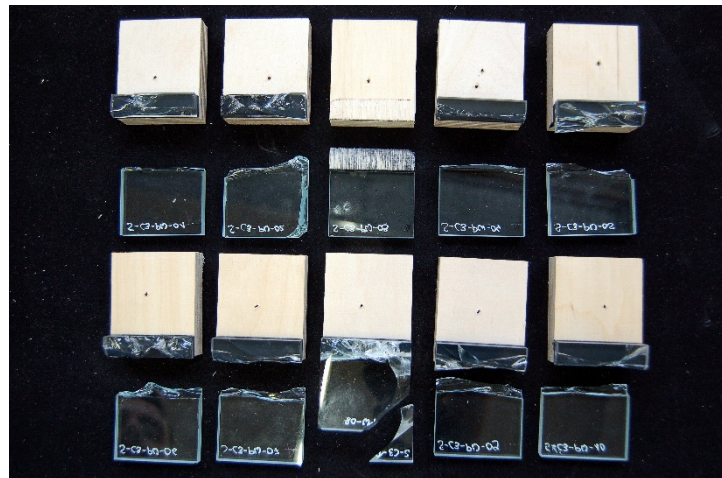


Bild B.46

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	90,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	10,0



Tafel B.23

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]		
S-C3-PW-01	2065,0	0,1	12,5	50,0	2,9	3,30	0,03
S-C3-PW-02	2634,7	0,1	12,0	50,0	3,2	4,40	0,03
S-C3-PW-03	1526,4	0,2	11,9	50,0	3,2	2,57	0,08
S-C3-PW-04	2460,5	0,1	11,7	50,0	3,2	4,22	0,03
S-C3-PW-05	2811,5	0,1	12,4	50,0	2,9	4,52	0,02
S-C3-PW-06	2394,4	0,0	11,9	50,0	3,0	4,03	0,02
S-C3-PW-07	2609,6	0,1	12,7	50,0	2,9	4,11	0,03
S-C3-PW-08	2176,2	0,3	12,0	50,0	2,7	3,64	0,12
S-C3-PW-09	3022,1	0,1	12,4	50,0	2,8	4,89	0,03
S-C3-PW-10	1723,7	0,2	12,8	50,0	2,6	2,70	0,08
Mittelwert X_{mean}	2342,4	0,1	12,2	50,0	2,9	3,84	0,05
Standardabw. σ_X	472,4					0,77	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1350,3					2,22	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch bei +25 °C (REF)

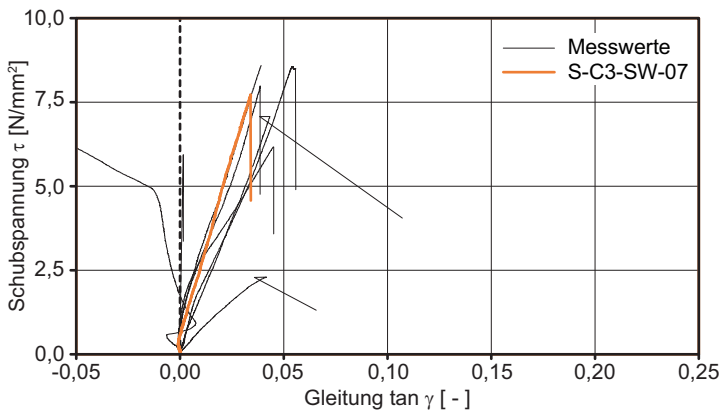


Bild B.47
Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 206,25 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

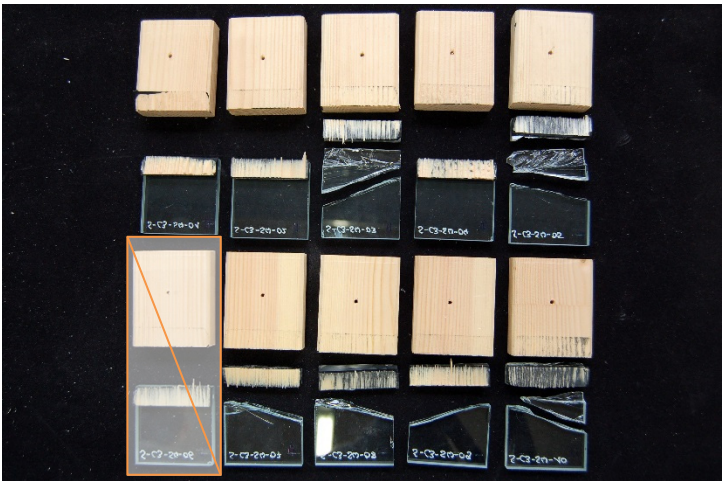


Bild B.48
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	22,2
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,6
Substratbruch Holz	77,2

Viele Proben zeigen sowohl Glas-, als auch Holzbruch. Bei der Mehrzahl brach zuerst das Holz. Diese Proben werden dem Substratbruch Holz zugeordnet.

Prüfkörper 6 wird nicht berücksichtigt.

Tafel B.24

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{\max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-C3-SW-01	4.390,0	-0,2	11,9	50,0	2,9	7,38	-0,06
S-C3-SW-02	1.349,6	0,1	11,8	50,0	2,9	2,29	0,04
S-C3-SW-03	5.168,8	0,2	12,1	50,0	3,0	8,56	0,05
S-C3-SW-04	3.687,3	0,1	12,0	50,0	2,9	6,17	0,05
S-C3-SW-05	4.624,0	0,1	11,6	50,0	2,8	7,98	0,04
S-C3-SW-06	Versuchsabbruch durch Messprogramm → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt						
S-C3-SW-07	4.597,4	0,1	11,9	50,0	2,9	7,73	0,03
S-C3-SW-08	3.622,5	0,1	12,2	50,0	2,6	5,93	0,00
S-C3-SW-09	4.324,0	0,1	12,2	50,0	3,0	7,07	0,04
S-C3-SW-10	5.250,1	0,1	12,2	50,0	3,0	8,59	0,04
Mittelwert X_{mean}	4112,6	0,1	12,0	50,0	2,9	6,85	0,03
Standardabw. σ_X	1177,0					1,95	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,14					2,14	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1593,8					2,68	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Scherversuch bei +80 °C

Bild B.49

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 4,16 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

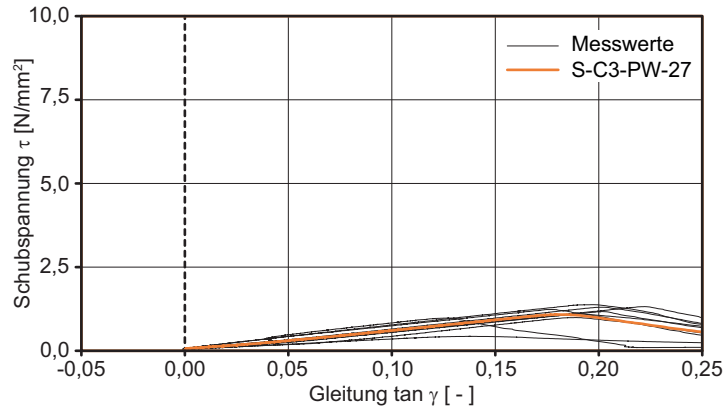
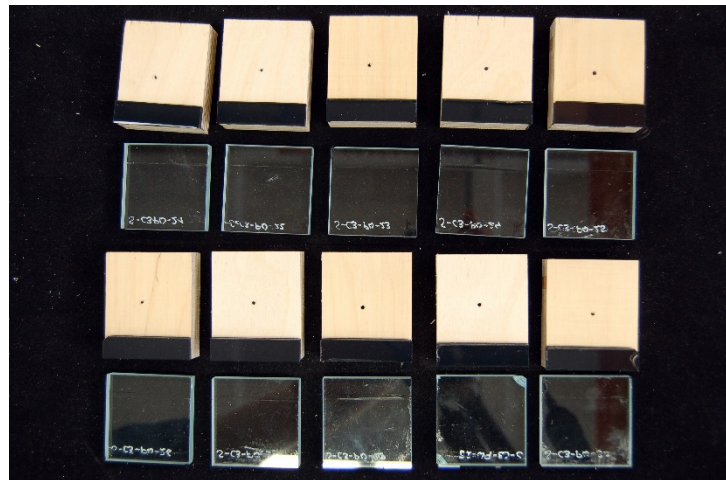


Bild B.50

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	100,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0



Tafel B.25

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-C3-PW-21	263,04	0,4	12,6	50,0	3,0		0,42	0,14
S-C3-PW-22	750,95	0,5	12,3	50,0	2,9		1,22	0,18
S-C3-PW-23	789,34	0,6	12,3	50,0	3,1		1,29	0,20
S-C3-PW-24	656,48	0,6	12,1	50,0	3,2		1,08	0,19
S-C3-PW-25	697,36	0,6	12,1	50,0	2,9		1,16	0,20
S-C3-PW-26	806,00	0,7	12,3	50,0	3,1		1,31	0,22
S-C3-PW-27	649,89	0,5	12,2	50,0	2,8		1,07	0,18
S-C3-PW-28	587,97	0,6	12,0	50,0	3,0		0,98	0,19
S-C3-PW-29	831,90	0,6	12,2	50,0	2,9		1,36	0,20
S-C3-PW-30	598,47	0,4	12,4	50,0	2,9		0,96	0,13
Mittelwert X_{mean}	663,1	0,5	12,3	50,0	3,0		1,08	0,18
Standardabw. σ_X	164,6						0,27	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10						2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	317,5						0,51	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch bei +80 °C

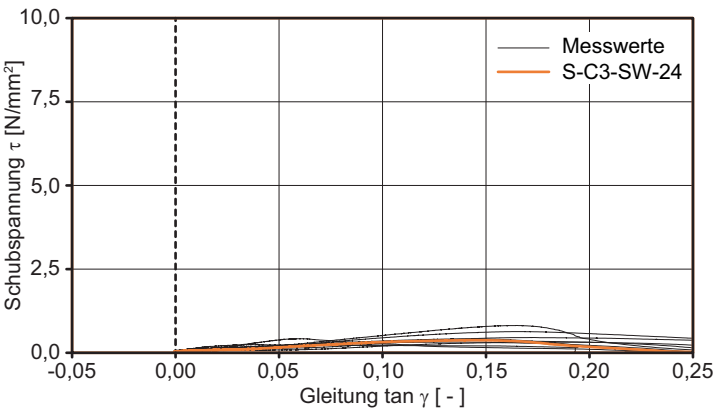


Bild B.51
Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 1,71 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

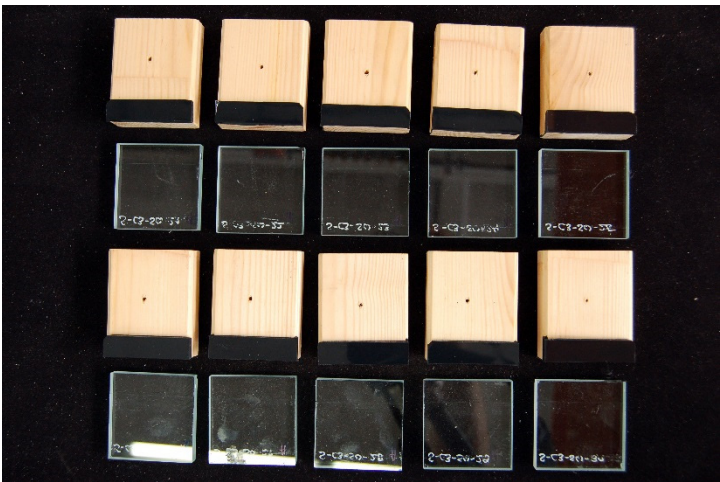


Bild B.52
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	100,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Tafel B.26

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-C3-SW-21	492,6	0,5	12,3	50,0	3,0	0,80	0,16
S-C3-SW-22	244,1	0,4	12,2	50,0	2,9	0,40	0,14
S-C3-SW-23	269,2	0,4	12,2	50,0	2,6	0,44	0,17
S-C3-SW-24	227,0	0,4	12,6	50,0	2,7	0,36	0,14
S-C3-SW-25	216,0	0,4	12,2	50,0	2,9	0,36	0,15
S-C3-SW-26	378,1	0,5	12,2	50,0	3,0	0,62	0,17
S-C3-SW-27	189,4	0,4	12,5	50,0	2,8	0,30	0,14
S-C3-SW-28	139,8	0,1	12,2	50,0	2,8	0,23	0,04
S-C3-SW-29	247,6	0,2	12,2	50,0	2,7	0,40	0,06
S-C3-SW-30	185,6	0,6	12,3	50,0	2,9	0,30	0,19
Mittelwert X_{mean}	259,0	0,4	12,3	50,0	2,8	0,42	0,14
Standardabw. σ_x	103,5					0,17	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	41,5					0,07	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Scherversuch nach UV- Bestrahlung für 500 h (UV1)

Bild B.53

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 127,50 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

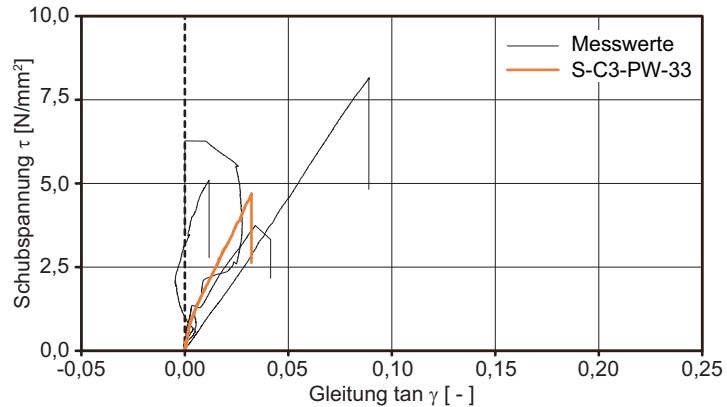
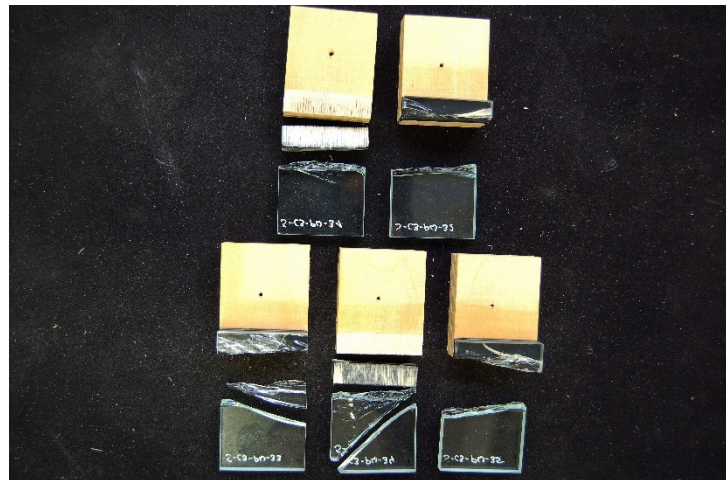


Bild B.54

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	60,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	40,0

Bei einigen Prüfkörpern traten Glas- und Holzbrüche auf. Das Holz versagte zuerst. Die Proben werden vollständig dem Substratbruch Holz zugeordnet.



Tafel B.27

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-C3-PW-31	3854,7	0,0	12,3	50,0	2,9		6,27	0,00
S-C3-PW-32	2321,2	0,1	12,4	50,0	3,0		3,73	0,03
S-C3-PW-33	2864,7	0,1	12,2	50,0	2,9		4,68	0,03
S-C3-PW-34	4994,9	0,3	12,2	50,0	2,9		8,16	0,09
S-C3-PW-35	3062,2	0,0	12,0	50,0	2,8		5,09	0,01
Mittelwert X_{mean}	3419,5	0,1	12,2	50,0	2,9		5,59	0,03
Standardabw. σ_X	1038,4						1,70	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	865,1						1,40	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch nach UV- Bestrahlung für 500 h (UV1)

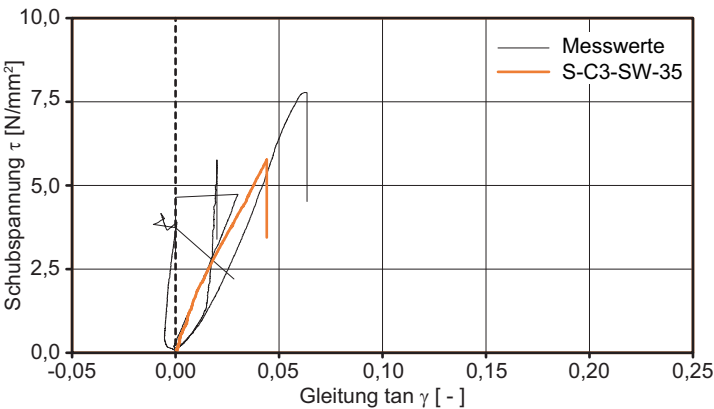


Bild B.55
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 154,71 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

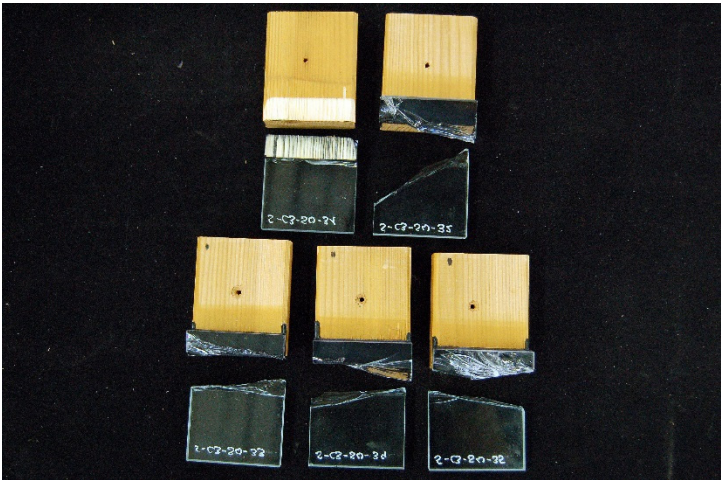


Bild B.56
 Bruchbilder.

Flächenanteile: [%]
 Substratbruch Glas 80,0
 Adhäsion Glas 0,0
 Kohäsion Klebfuge 0,0
 Adhäsion Holz 0,0
 Substratbruch Holz 20,0

Tafel B.28

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{\max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-C3-SW-31	2559,4	0,0	12,3	50,0	3,0	4,15	-0,01
S-C3-SW-32	4950,3	0,2	12,7	50,0	2,8	7,78	0,06
S-C3-SW-33	3555,3	0,1	12,4	50,0	2,8	5,75	0,02
S-C3-SW-34	2909,5	0,1	12,3	50,0	3,0	4,73	0,03
S-C3-SW-35	3499,5	0,1	12,1	50,0	2,9	5,77	0,04
Mittelwert X_{mean}	3494,8	0,1	12,4	50,0	2,9	5,64	0,03
Standardabw. σ_X	913,7					1,38	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1247,0					2,24	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Scherversuch nach UV- Bestrahlung für 1000 h (UV2)

Bild B.57

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 39,65 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

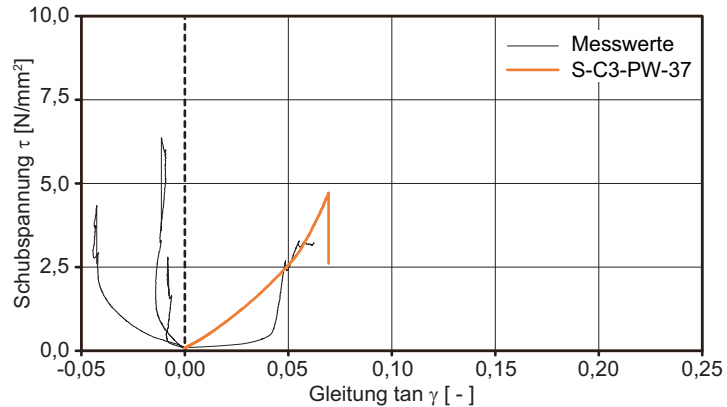
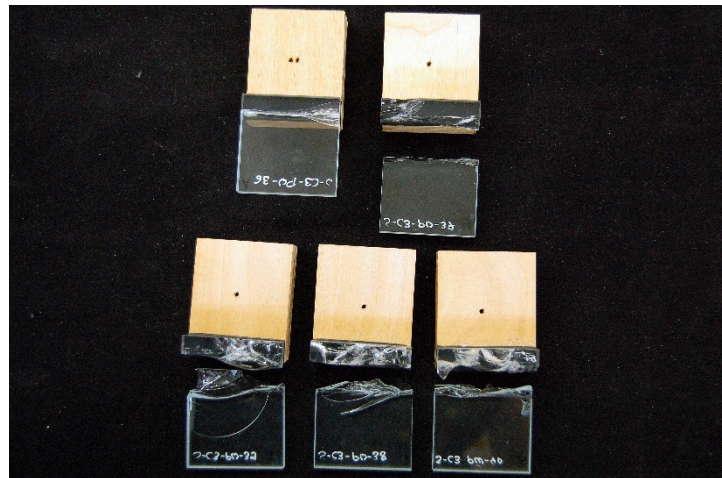


Bild B.58

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	100,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0



Tafel B.29

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-C3-PW-36	2033,4	0,2	12,4	50,0	3,0		3,28	0,06
S-C3-PW-37	2843,5	0,2	12,1	50,0	3,0		4,71	0,07
S-C3-PW-38	3915,6	0,0	12,3	50,0	3,0		6,36	-0,01
S-C3-PW-39	2623,5	-0,1	12,1	50,0	3,2		4,33	-0,04
S-C3-PW-40	1720,4	0,0	12,4	50,0	2,9		2,79	-0,01
Mittelwert X_{mean}	2627,3	0,0	12,3	50,0	3,0		4,29	0,01
Standardabw. σ_x	848,8						1,39	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	539,3						0,87	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch nach UV- Bestrahlung für 1000 h (UV2)

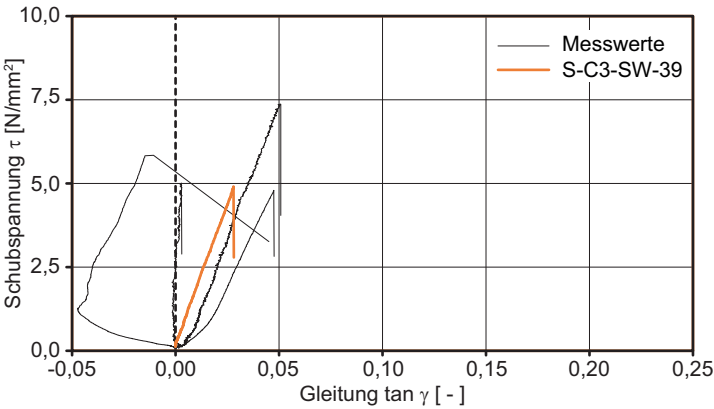


Bild B.59
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 171,13 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

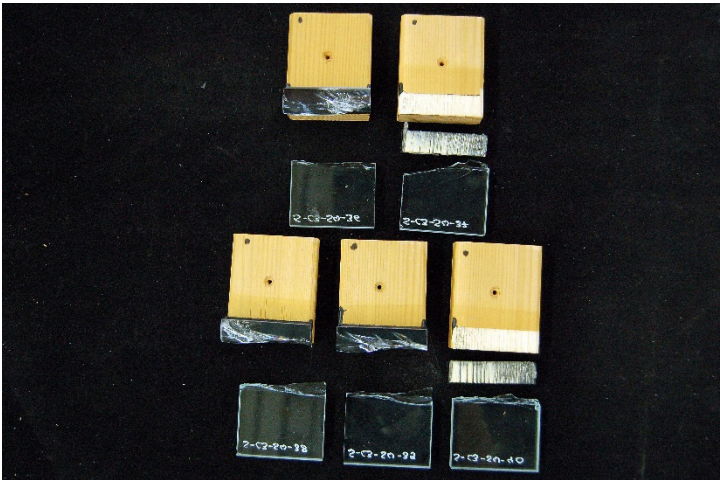


Bild B.60
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	60,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	40,0

Tafel B.30

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-C3-SW-36	2991,9	0,1	12,5	50,0	2,8		4,79	0,05
S-C3-SW-37	3591,7	0,0	12,3	50,0	3,0		5,84	-0,01
S-C3-SW-38	3090,5	0,0	12,4	50,0	2,9		5,00	0,00
S-C3-SW-39	3030,9	0,1	12,4	50,0	3,0		4,90	0,03
S-C3-SW-40	4509,8	0,2	12,2	50,0	3,0		7,37	0,05
Mittelwert X_{mean}	3443,0	0,1	12,4	50,0	2,9		5,58	0,02
Standardabw. σ_x	643,8						1,08	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1859,3						2,92	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz

Scherversuch nach Reinigungsmittellagerung (REI)

Bild B.61

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 115,14 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

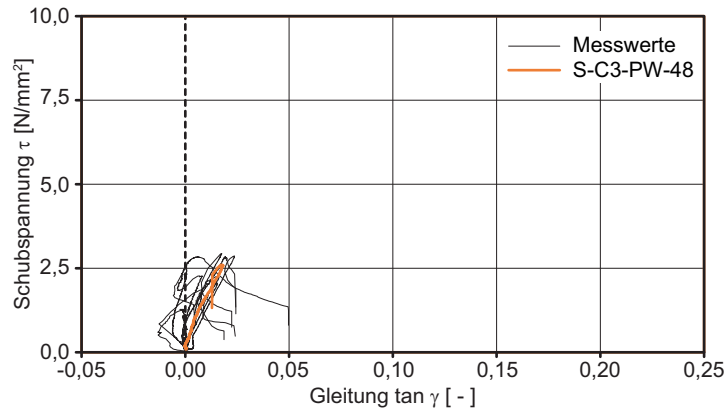
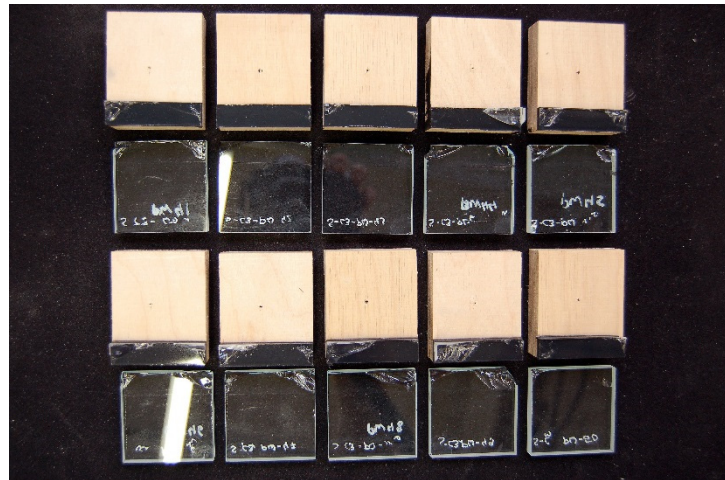


Bild B.62

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	21,0
Adhäsion Glas	79,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0



Tafel B.31

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{\max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-C3-PW-41	1525,1	0,0	12,0	50,0	3,0	2,54	0,00
S-C3-PW-42	1327,1	0,0	11,9	50,0	2,9	2,24	0,02
S-C3-PW-43	1215,3	0,0	11,9	50,0	3,0	2,04	0,02
S-C3-PW-44	1600,9	0,0	11,3	50,0	2,9	2,83	0,01
S-C3-PW-45	1751,4	0,1	12,0	50,0	3,0	2,93	0,02
S-C3-PW-46	1702,6	0,1	11,9	50,0	3,0	2,86	0,02
S-C3-PW-47	1683,1	0,1	11,9	50,0	2,9	2,82	0,02
S-C3-PW-48	1589,6	0,1	12,3	50,0	3,1	2,59	0,02
S-C3-PW-49	1119,2	0,0	12,1	50,0	2,9	1,85	0,01
S-C3-PW-50	775,8	0,0	12,3	50,0	3,0	1,26	0,00
Mittelwert X_{mean}	1429,0	0,0	12,0	50,0	3,0	2,40	0,01
Standardabw. σ_X	313,9					0,54	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	769,9					1,26	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch nach Reinigungsmittellagerung (REI)

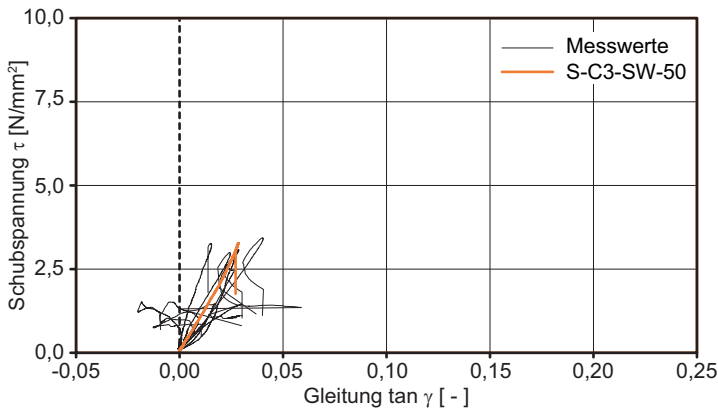


Bild B.63
Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 103,04 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$



Bild B.64
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	15,0
Adhäsion Glas	85,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Tafel B.32

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{\max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-C3-SW-41	867,1	0,1	12,0	50,0	2,9	1,44	0,03
S-C3-SW-42	1951,0	0,0	12,0	50,0	2,8	3,25	0,01
S-C3-SW-43	938,1	-0,1	12,5	50,0	3,0	1,50	-0,02
S-C3-SW-44	1607,9	0,1	12,3	50,0	3,1	2,63	0,02
S-C3-SW-45	1875,5	0,1	12,2	50,0	2,7	3,08	0,03
S-C3-SW-46	731,6	0,0	12,1	50,0	3,1	1,21	0,00
S-C3-SW-47	922,2	0,0	12,3	50,0	2,9	1,50	0,00
S-C3-SW-48	1779,6	0,1	11,9	50,0	2,6	2,98	0,02
S-C3-SW-49	2065,8	0,1	12,1	50,0	3,0	3,43	0,04
S-C3-SW-50	1971,4	0,1	12,1	50,0	2,9	3,27	0,03
Mittelwert X_{mean}	1471,0	0,0	12,1	50,0	2,9	2,43	0,02
Standardabw. σ_X	538,4					0,90	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{U,5}$	340,4					0,54	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz
Scherversuch nach Befeuchtung +20 °C | 90 % rF (FEU)

Bild B.65
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 81,50 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

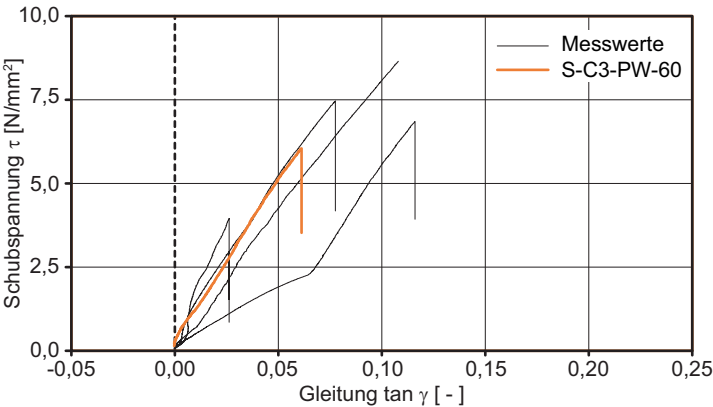
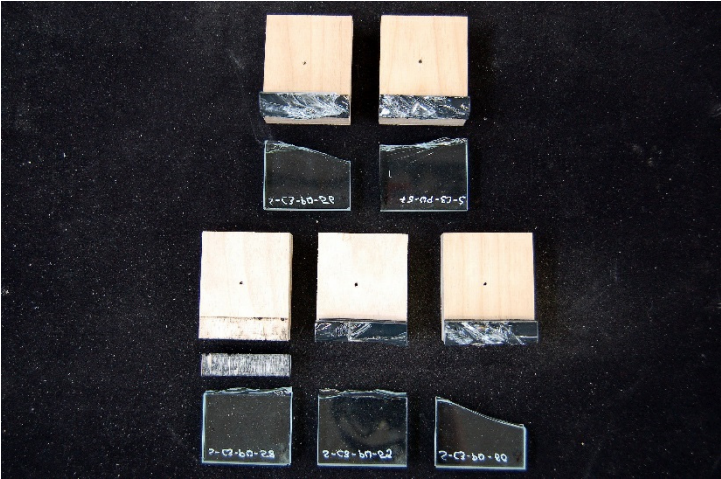


Bild B.66
 Bruchbilder.

Flächenanteile: [%]
 Substratbruch Glas 100,0
 Adhäsion Glas 0,0
 Kohäsion Klebfuge 0,0
 Adhäsion Holz 0,0
 Substratbruch Holz 0,0

An einem Prüfkörper trat Glasbruch und Adhäsionsbruch simultan auf. Die Wertung erfolgt als Glasbruch.



Tafel B.33

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]		
S-C3-PW-56	4636,5	0,2	12,4	50,0	2,6	7,46	0,08
S-C3-PW-57	5250,0	0,3	12,1	50,0	2,9	8,65	0,11
S-C3-PW-58	2458,9	0,1	12,5	50,0	3,1	3,94	0,03
S-C3-PW-59	4200,1	0,4	12,3	50,0	3,1	6,85	0,12
S-C3-PW-60	3751,4	0,2	12,4	50,0	2,9	6,04	0,06
Mittelwert \bar{X}_{mean}	4059,4	0,2	12,3	50,0	2,9	6,59	0,08
Standardabw. $\sigma_{\bar{X}}$	1052,0					1,76	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1471,4					2,26	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch nach Befeuchtung +20 °C | 90 % rF (FEU)

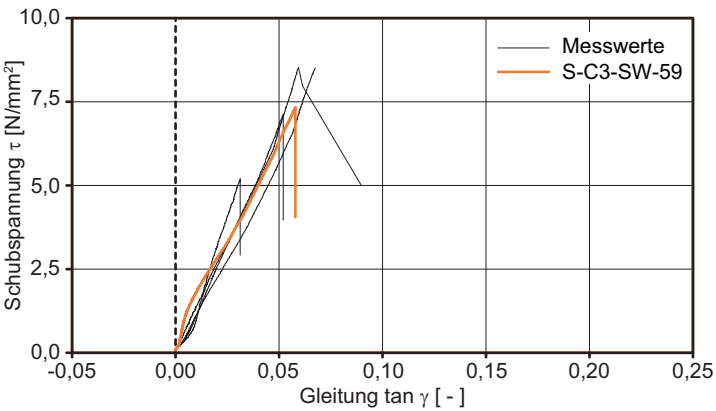


Bild B.67
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 119,37 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

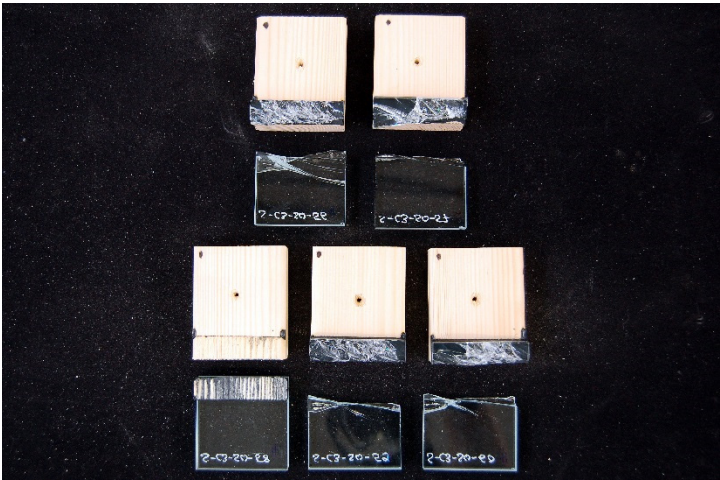


Bild B.68
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	80,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	10,0
Substratbruch Holz	10,0

Tafel B.34

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-C3-SW-56	5137,9	0,2	12,1	50,0	2,8		8,52	0,06
S-C3-SW-57	3103,0	0,1	12,0	50,0	2,9		5,19	0,03
S-C3-SW-58	5250,1	0,2	12,3	50,0	2,5		8,51	0,07
S-C3-SW-59	4460,7	0,2	12,2	50,0	2,9		7,32	0,06
S-C3-SW-60	4345,0	0,2	12,2	50,0	2,9		7,12	0,05
Mittelwert X_{mean}	4459,3	0,1	12,1	50,0	2,8		7,33	0,05
Standardabw. σ_X	857,1						1,36	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	2350,8						3,98	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Scherversuch nach Trocknung +20 °C | < 30 % rF (TRO)

Bild B.69

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 190,60 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

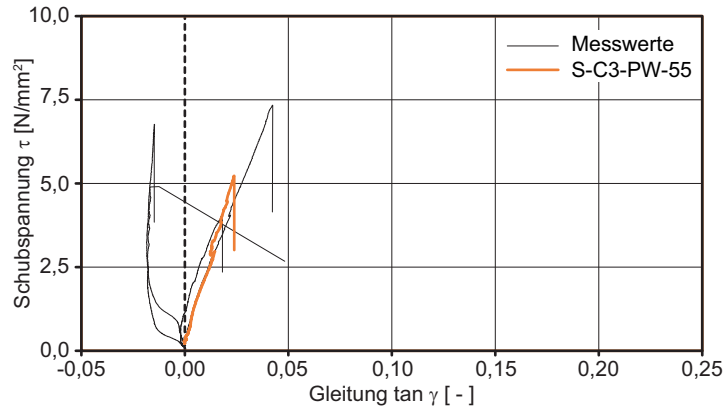
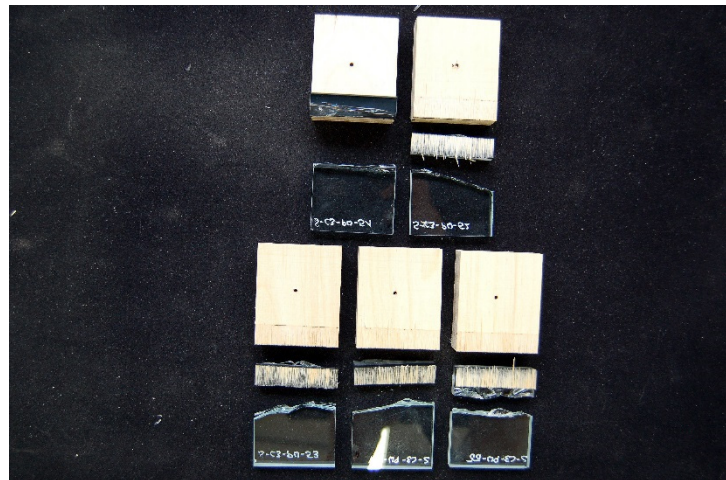


Bild B.70

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	20,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	80,0

Bei einigen Prüfkörpern traten Glas und Holzbrüche auf. Das Holz versagte zuerst. Die Proben werden vollständig dem Substratbruch Holz zugeordnet.



Tafel B.35

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]			
S-C3-PW-51	2430,0	0,1	11,9	50,0	3,0		4,10	0,02
S-C3-PW-52	3977,0	0,0	11,8	50,0	2,8		6,76	-0,01
S-C3-PW-53	4386,5	0,1	12,0	50,0	3,0		7,34	0,04
S-C3-PW-54	2880,7	0,0	11,8	50,0	3,0		4,90	-0,01
S-C3-PW-55	3092,1	0,1	11,8	50,0	3,0		5,22	0,02
Mittelwert \bar{X}_{mean}	3353,3	0,0	11,8	50,0	3,0		5,66	0,01
Standardabw. σ_X	806,3						1,34	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46						2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1369,7						2,36	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch nach Trocknung +20 °C | < 30 % rF (TRO)

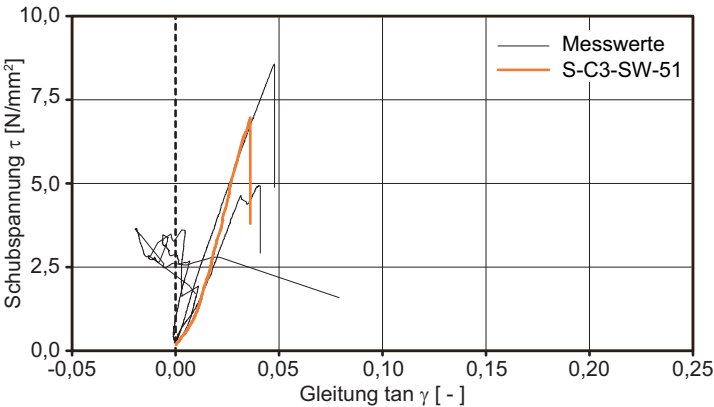


Bild B.71
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 158,94 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

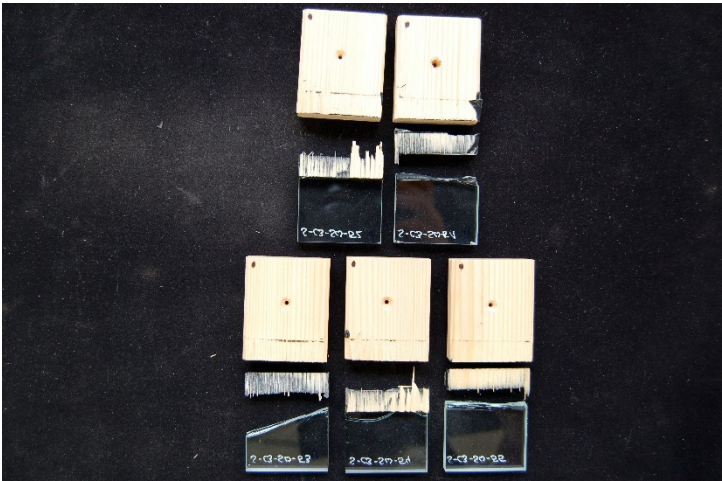


Bild B.72
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	20,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	2,0
Substratbruch Holz	78,0

Bei einigen Prüfkörpern traten Glas- und Holzbrüche auf. Dort, wo das Holz zuerst versagte werden die Proben vollständig dem Substratbruch Holz zugeordnet. Bei simultanem Versagen beträgt der Anteil jeweils 50 %.

Tafel B.36

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{\max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-C3-SW-51	4183,8	0,1	12,0	50,0	2,8	6,96	0,04
S-C3-SW-52	2197,1	-0,1	12,0	50,0	2,9	3,65	-0,02
S-C3-SW-53	5243,3	0,1	12,2	50,0	3,0	8,57	0,05
S-C3-SW-54	2127,3	0,0	12,3	50,0	2,8	3,46	-0,01
S-C3-SW-55	3023,7	0,1	12,3	50,0	2,6	4,92	0,04
Mittelwert X_{mean}	3355,0	0,1	12,2	50,0	2,8	5,51	0,02
Standardabw. σ_X	1342,6					2,21	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	52,2					0,09	

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Scherversuch nach SO₂-Lagerung (SO₂)

Bild B.73

Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 104,55 \text{ N/mm}^2$
im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

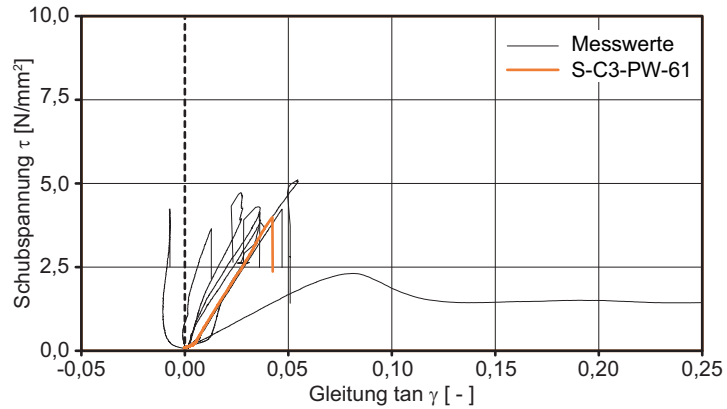
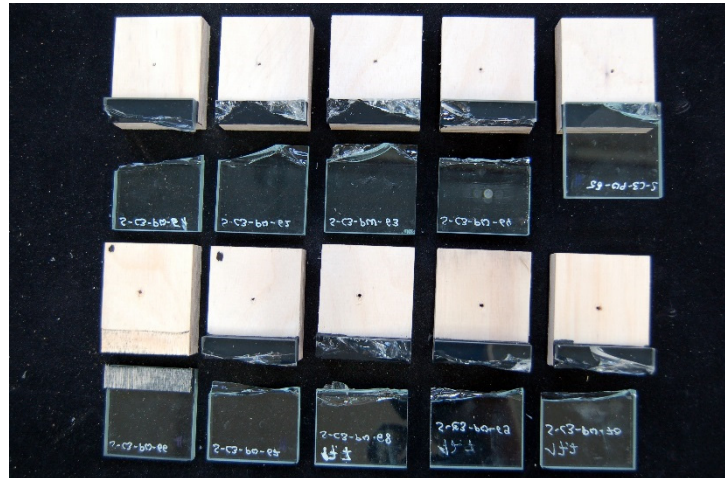


Bild B.74

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	71,5
Adhäsion Glas	18,5
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	10,0
Substratbruch Holz	0,0



Tafel B.37

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			Spannung τ_{max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
	Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]		
S-C3-PW-61	2395,3	0,1	12,0	50,0	2,9	3,98	0,04
S-C3-PW-62	2932,2	0,1	12,4	50,0	2,9	4,72	0,03
S-C3-PW-63	2675,1	0,1	12,5	50,0	3,0	4,29	0,04
S-C3-PW-64	2528,4	0,1	12,0	50,0	3,0	4,22	0,05
S-C3-PW-65	1995,2	0,1	12,4	50,0	2,7	3,21	0,04
S-C3-PW-66	1408,1	0,3	12,3	50,0	3,1	2,30	0,08
S-C3-PW-67	2630,0	0,0	12,4	50,0	2,9	4,23	-0,01
S-C3-PW-68	3096,5	0,2	12,2	50,0	2,9	5,10	0,05
S-C3-PW-69	2248,3	0,0	12,4	50,0	3,3	3,63	0,01
S-C3-PW-70	2516,3	0,1	12,2	50,0	3,0	4,14	0,04
Mittelwert X_{mean}	2442,5	0,1	12,3	50,0	3,0	3,98	0,04
Standardabw. σ_X	480,7					0,79	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{0,5}$	1433,1					2,33	

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Scherversuch nach SO₂-Lagerung (SO₂)

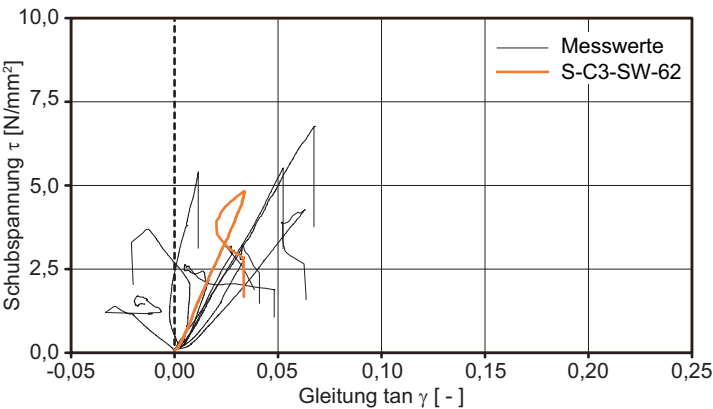


Bild B.75
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

$G_{rep} = 149,59 \text{ N/mm}^2$
 im Gleitungsbereich
 $0,005 \leq \tan \gamma \leq 0,015$

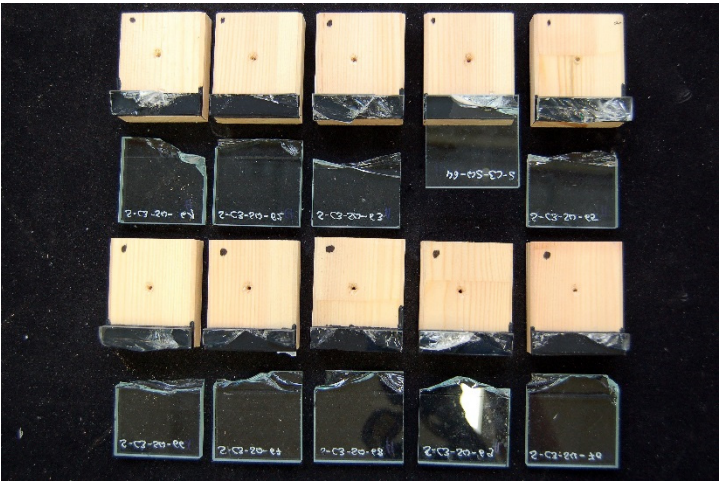


Bild B.76
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	61,0
Adhäsion Glas	39,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Tafel B.38

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie				
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung τ_{\max} [N/mm ²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
S-C3-SW-61	2257,7	0,0	12,3	50,0	2,8	3,68	-0,01
S-C3-SW-62	2979,2	0,1	12,4	50,0	2,9	4,82	0,03
S-C3-SW-70	1621,9	0,0	12,4	50,0	2,8	2,62	0,00
S-C3-SW-63	3266,4	0,0	12,1	50,0	2,8	5,40	0,01
S-C3-SW-64	1031,5	-0,1	12,2	50,0	2,8	1,69	-0,02
S-C3-SW-65	4202,5	0,2	12,4	50,0	2,3	6,77	0,07
S-C3-SW-66	3326,5	0,1	12,1	50,0	2,7	5,51	0,05
S-C3-SW-67	1967,4	0,1	12,2	50,0	3,1	3,23	0,03
S-C3-SW-68	2569,9	0,2	12,0	50,0	2,7	4,27	0,06
S-C3-SW-69	1980,9	0,1	12,4	50,0	3,0	3,19	0,02
Mittelwert X_{mean}	2520,4	0,1	12,2	50,0	2,8	4,12	0,03
Standardabw. σ_X	939,2					1,53	
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10	
5 %-Quantil $R_{u,5}$	548,1					0,90	

A – Ottocoll S660 – Sperrholz Zugversuch bei +25 °C (REF)

Bild B.77

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

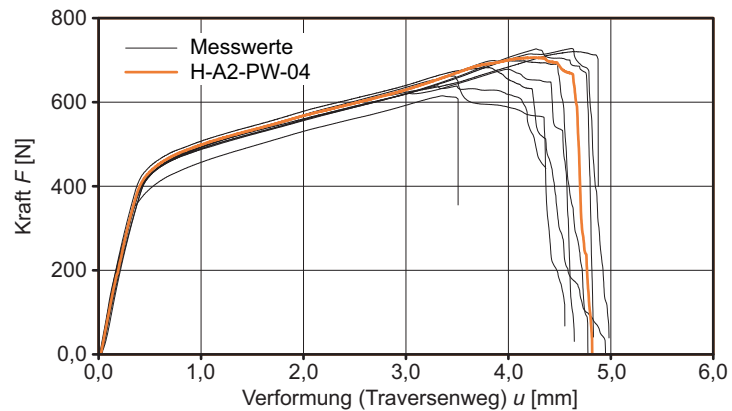


Bild B.78

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	81,5
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	18,5



Tafel B.39

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-A2-PW-01	698,6	4,1	50,0	11,7	3,0	1,19
H-A2-PW-02	720,6	4,7	50,0	12,2	2,9	1,18
H-A2-PW-03	682,4	3,8	50,0	11,7	3,0	1,16
H-A2-PW-04	706,4	4,3	50,0	11,8	2,9	1,20
H-A2-PW-05	678,3	4,0	50,0	11,6	3,0	1,17
H-A2-PW-06	615,0	3,4	50,0	12,0	2,9	1,02
H-A2-PW-07	639,1	3,3	50,0	11,7	3,0	1,10
H-A2-PW-08	727,8	4,6	50,0	11,8	3,0	1,24
H-A2-PW-09	726,8	4,3	50,0	11,6	2,9	1,25
H-A2-PW-10	662,2	3,5	50,0	11,9	3,0	1,11
Mittelwert \bar{X}_{mean}	685,7	4,0	50,0	11,8	3,0	1,16
Standardabw. σ_x	38,1					0,07
Exzentrizität $\varepsilon_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	605,7					1,02

A – Ottocoll S660 – Vollholz
Zugversuch bei +25 °C (REF)

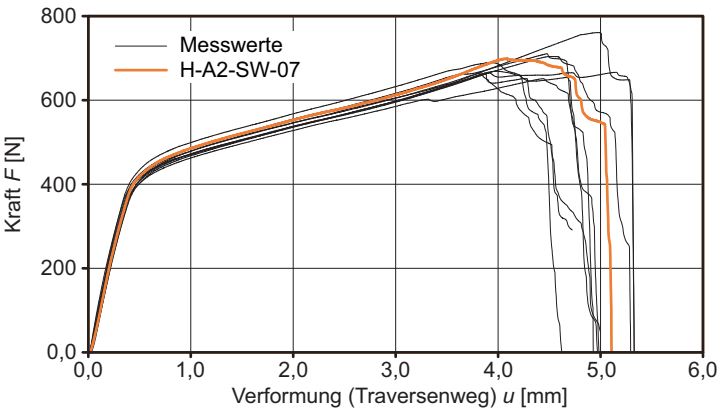


Bild B.79
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

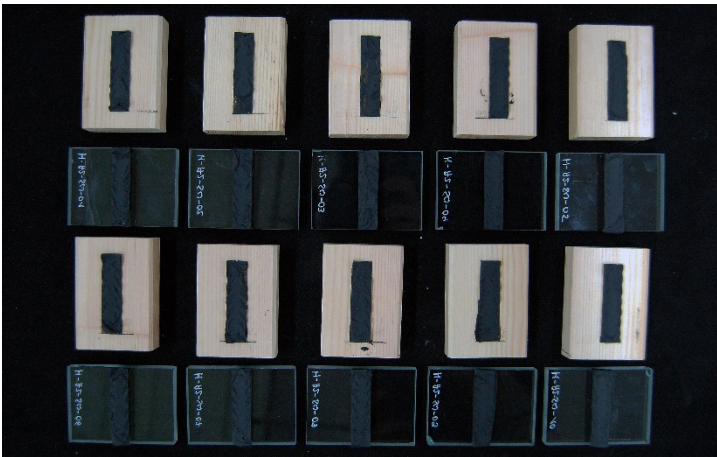


Bild B.80
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	97,5
Adhäsion Holz	2,5
Substratbruch Holz	0,0

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-A2-SW-01	662,5	3,9	50,0	11,8	3,0	1,12
H-A2-SW-02	651,1	4,4	50,0	12,1	3,0	1,07
H-A2-SW-03	665,0	3,8	50,0	11,9	3,0	1,11
H-A2-SW-04	761,0	5,0	50,0	11,6	3,0	1,32
H-A2-SW-05	666,3	5,2	50,0	12,1	3,0	1,11
H-A2-SW-06	704,2	4,5	50,0	11,8	3,0	1,19
H-A2-SW-07	698,4	4,1	50,0	12,1	3,0	1,16
H-A2-SW-08	690,1	3,9	50,0	12,1	3,0	1,14
H-A2-SW-09	710,8	4,5	50,0	11,9	2,9	1,19
H-A2-SW-10	669,0	4,0	50,0	11,7	3,0	1,15
Mittelwert \bar{X}_{mean}	687,8	4,3	50,0	11,9	3,0	1,16
Standardabw. $\sigma_{\bar{x}}$	32,7					0,07
Exzentrizität $z_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	619,3					1,02

Tafel B.40

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Zugversuch bei -20 °C

Bild B.81

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

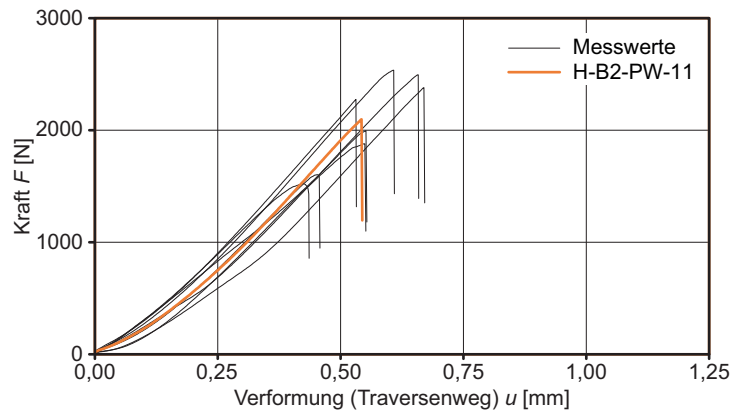
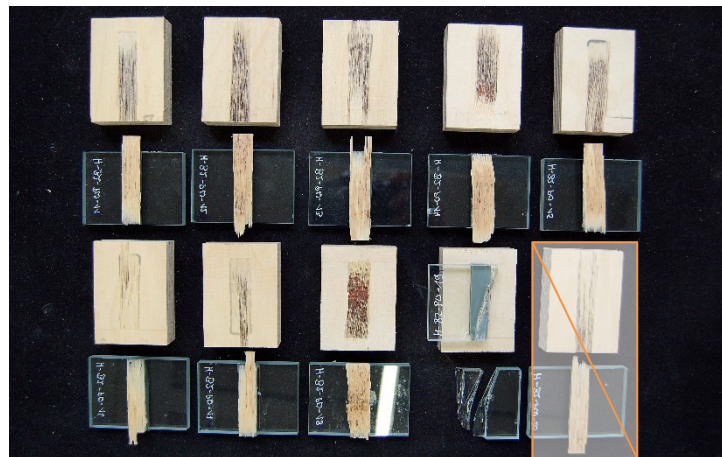


Bild B.82

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	11,1
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	88,9

Prüfkörper 10 wird nicht be-
rücksichtigt.



Tafel B.41

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-PW-11	2095,9	0,5	50,0	12,2	3,0	3,44
H-B2-PW-12	1877,6	0,6	50,0	11,9	3,0	3,15
H-B2-PW-13	2494,4	0,7	50,0	12,0	2,9	4,14
H-B2-PW-14	1520,3	0,4	50,0	12,0	2,9	2,54
H-B2-PW-15	1993,9	0,6	50,0	11,9	3,1	3,34
H-B2-PW-16	2378,9	0,7	50,0	12,5	3,1	3,81
H-B2-PW-17	2534,9	0,6	50,0	12,2	3,1	4,17
H-B2-PW-18	1600,7	0,5	50,0	12,2	3,0	2,63
H-B2-PW-19	2274,6	0,5	50,0	12,1	2,9	3,77
H-B2-PW-20	Prüfkörper verrutscht → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt					
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2085,7	0,6	50,0	12,1	3,0	3,44
Standardabw. $\sigma_{\bar{x}}$	370,3					0,59
Exzentrizität $\bar{\epsilon}_{\alpha\beta}$	2,14					2,14
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1293,2					2,17

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch bei -20 °C

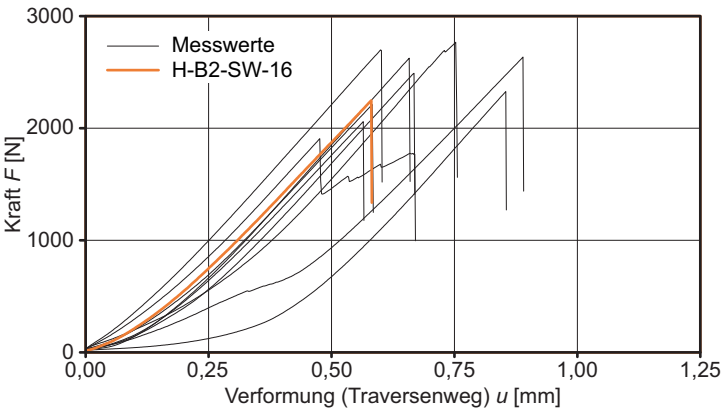


Bild B.83
Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.



Bild B.84
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	12,0
Substratbruch Holz	88,0

Tafel B.42

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-SW-11	2325,6	0,9	50,0	12,1	2,9	3,85
H-B2-SW-12	2624,5	0,7	50,0	12,0	3,0	4,37
H-B2-SW-13	2766,6	0,8	50,0	12,1	2,9	4,59
H-B2-SW-14	2057,1	0,6	50,0	11,8	3,0	3,50
H-B2-SW-15	2209,6	0,6	50,0	12,0	3,0	3,70
H-B2-SW-16	2246,9	0,6	50,0	12,0	3,0	3,74
H-B2-SW-17	2698,5	0,6	50,0	12,2	3,0	4,42
H-B2-SW-18	2489,2	0,7	50,0	12,0	3,0	4,16
H-B2-SW-19	1905,2	0,5	50,0	12,1	3,0	3,15
H-B2-SW-20	2634,4	0,9	50,0	12,2	2,9	4,33
Mittelwert \bar{x}_{mean}	2395,8	0,7	50,0	12,0	3,0	3,98
Standardabw. σ_x	291,4					0,47
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1783,8					3,00

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Zugversuch bei +25 °C (REF)

Bild B.85

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

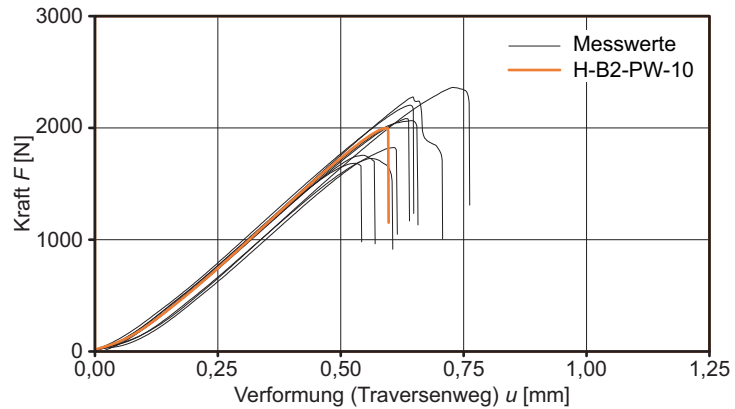
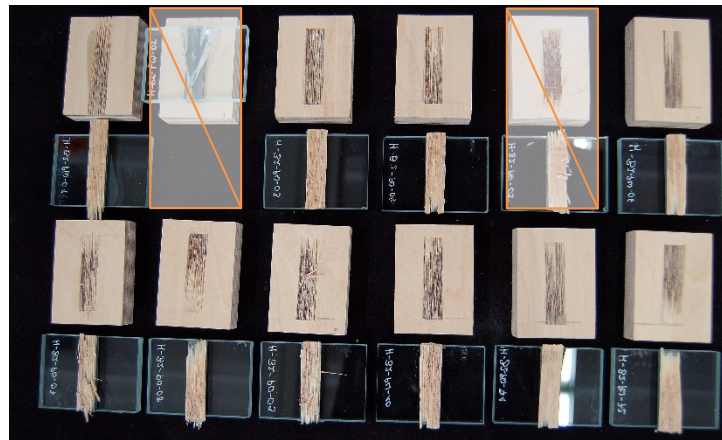


Bild B.86

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	100,0

Prüfkörper 2 und 5 werden
nicht berücksichtigt. Zwei
Zusatzprüfungen.



Tafel B.43

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie		Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]		
H-B2-PW-01	2081,8	0,6	50,0	11,8	3,0	3,52
H-B2-PW-02	Prüfkörper verrutscht, früher Glasbruch → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt					
H-B2-PW-03	1822,5	0,6	50,0	11,9	3,0	3,07
H-B2-PW-04	1753,6	0,5	50,0	11,7	3,0	2,99
H-B2-PW-05	Prüfkörper verrutscht → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt					
H-B2-PW-06	1724,7	0,6	50,0	11,8	2,9	2,94
H-B2-PW-07	2276,1	0,6	50,0	12,2	3,0	3,73
H-B2-PW-08	2064,2	0,6	50,0	11,9	3,0	3,46
H-B2-PW-09	2362,0	0,7	50,0	12,1	3,0	3,91
H-B2-PW-10	1998,3	0,6	50,0	11,9	2,9	3,36
H-B2-PW-71	1681,9	0,5	50,0	12,0	3,0	2,81
H-B2-PW-72	2202,7	0,6	50,0	12,0	3,0	3,67
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1996,8	0,6	50,0	11,9	3,0	3,35
Standardabw. σ_X	242,3					0,37
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1488,0					2,56

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch bei +25 °C (REF)

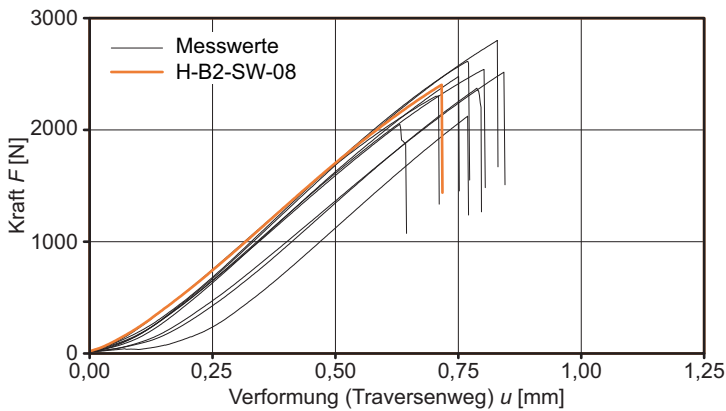


Bild B.87
Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.



Bild B.88
Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	16,0
Substratbruch Holz	84,0

Prüfkörper 2 wird nicht berücksichtigt. Eine Zusatzprüfung.

Tafel B.44

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-SW-01	2304,7	0,7	50,0	11,8	3,0	3,91
H-B2-SW-02	Prüfkörper verrutscht → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt					
H-B2-SW-03	2516,2	0,8	50,0	11,8	3,1	4,26
H-B2-SW-04	2121,3	0,8	50,0	12,0	3,0	3,53
H-B2-SW-05	2478,0	0,8	50,0	11,9	3,1	4,16
H-B2-SW-06	2048,5	0,6	50,0	11,8	3,0	3,47
H-B2-SW-07	2613,9	0,8	50,0	11,7	3,0	4,46
H-B2-SW-08	2403,1	0,7	50,0	11,8	2,9	4,09
H-B2-SW-09	2372,7	0,8	50,0	11,9	3,0	3,98
H-B2-SW-10	2800,6	0,8	50,0	12,0	3,0	4,67
H-B2-SW-71	2541,3	0,8	50,0	11,9	3,1	4,27
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2420,0	0,8	50,0	11,9	3,0	4,08
Standardabw. σ_X	224,3					0,38
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1949,0					3,29

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Zugversuch bei +80 °C

Bild B.89

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

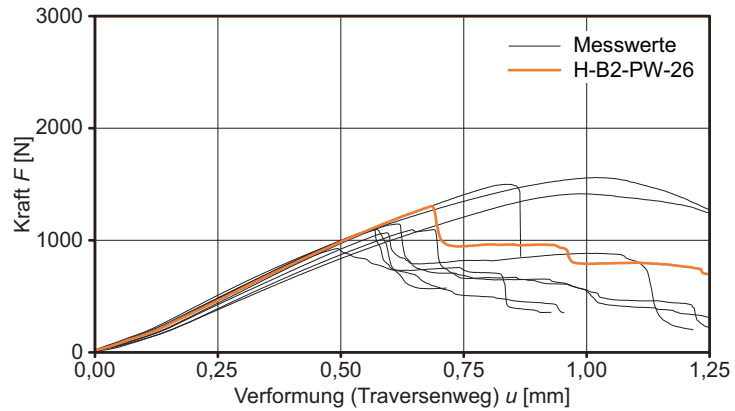


Bild B.90

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	20,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	80,0



Tafel B.45

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-PW-21	1412,8	1,0	50,0	11,9	2,9	2,37
H-B2-PW-22	1092,3	0,7	50,0	11,9	3,0	1,84
H-B2-PW-23	1497,1	0,8	50,0	11,9	3,1	2,52
H-B2-PW-24	1064,4	0,6	50,0	12,0	3,0	1,77
H-B2-PW-25	1098,3	0,6	50,0	12,1	2,9	1,82
H-B2-PW-26	1301,3	0,7	50,0	12,1	3,0	2,15
H-B2-PW-27	923,1	0,5	50,0	12,0	3,0	1,53
H-B2-PW-28	1557,3	1,0	50,0	12,1	3,0	2,57
H-B2-PW-29	1142,0	0,6	50,0	12,1	3,0	1,89
H-B2-PW-30	1094,4	0,6	50,0	12,0	3,0	1,82
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1218,3	0,7	50,0	12,0	3,0	2,03
Standardabw. σ_X	210,7					0,35
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	775,8					1,29

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch bei +80 °C

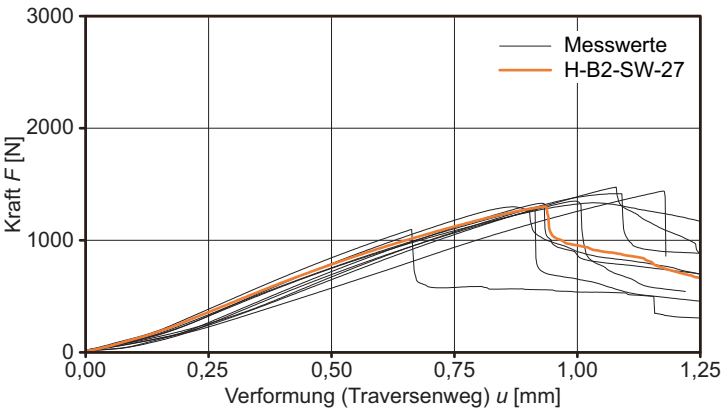


Bild B.91
 Kraft-Verformungs-
 Diagramm mit Markierung
 eines repräsentativen
 Prüfkörpers.

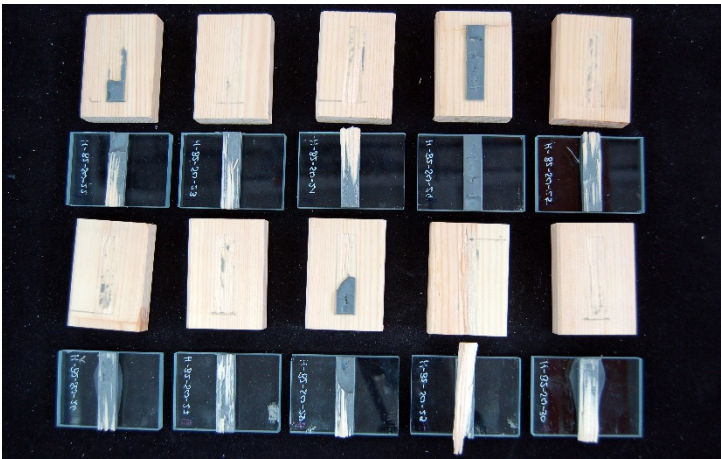


Bild B.92
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	17,0
Adhäsion Holz	43,0
Substratbruch Holz	40,0

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-SW-21	1290,9	0,9	50,0	11,9	3,0	2,18
H-B2-SW-22	1327,2	0,9	50,0	12,1	3,0	2,20
H-B2-SW-23	1346,8	1,0	50,0	11,8	3,0	2,29
H-B2-SW-24	1333,1	1,0	50,0	12,0	2,9	2,22
H-B2-SW-25	1471,5	1,1	50,0	12,0	3,0	2,45
H-B2-SW-26	1296,2	0,9	50,0	12,1	3,0	2,15
H-B2-SW-27	1298,4	0,9	50,0	12,0	2,9	2,16
H-B2-SW-28	1413,7	1,1	50,0	12,0	2,9	2,36
H-B2-SW-29	1437,1	1,2	50,0	12,0	2,9	2,41
H-B2-SW-30	1093,6	0,7	50,0	12,0	3,0	1,83
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1330,9	1,0	50,0	12,0	3,0	2,22
Standardabw. $\sigma_{\bar{x}}$	104,5					0,17
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1111,3					1,86

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Zugversuch nach UV-Bestrahlung für 500 h (UV1)

Bild B.93

Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

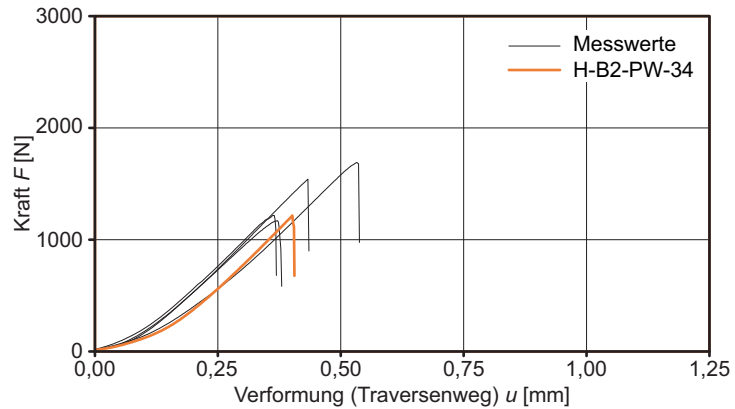
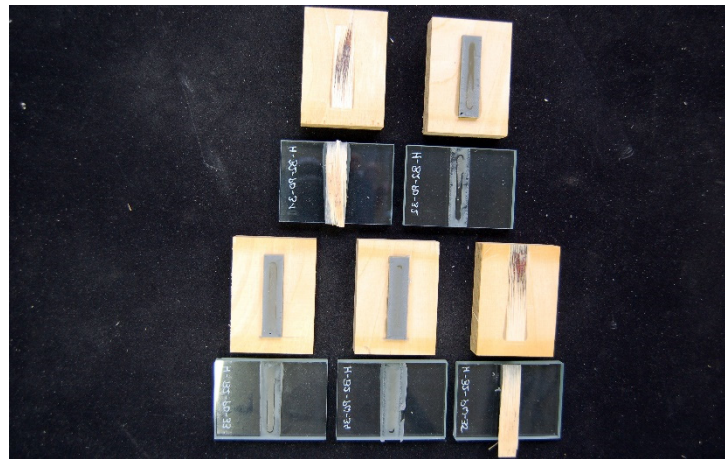


Bild B.94

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	12,0
Kohäsion Klebfuge	48,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	40,0

Die Kohäsionsbrüche treten oberflächennah (Glas)auf.



Tafel B.47

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-PW-31	1166,4	0,4	50,0	12,0	3,0	1,94
H-B2-PW-32	1538,7	0,4	50,0	12,2	3,0	2,53
H-B2-PW-33	1214,9	0,4	50,0	12,2	3,0	2,00
H-B2-PW-34	1213,3	0,4	50,0	12,1	3,1	2,01
H-B2-PW-35	1689,1	0,5	50,0	12,0	3,0	2,81
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1364,5	0,4	50,0	12,1	3,0	2,26
Standardabw. $\sigma_{\bar{X}}$	234,6					0,39
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	787,3					1,30

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch nach UV-Bestrahlung für 500 h (UV1)

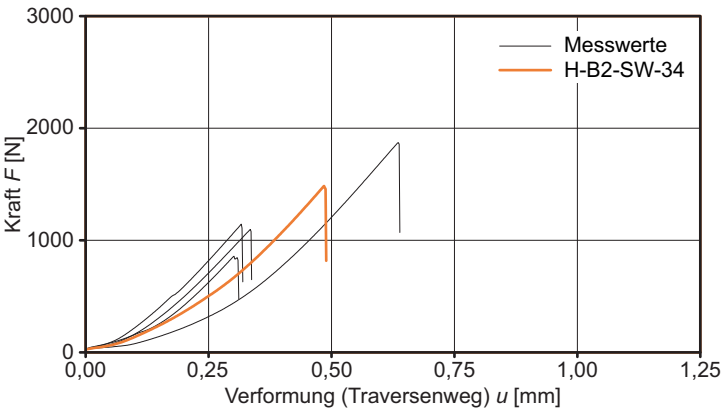


Bild B.95
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

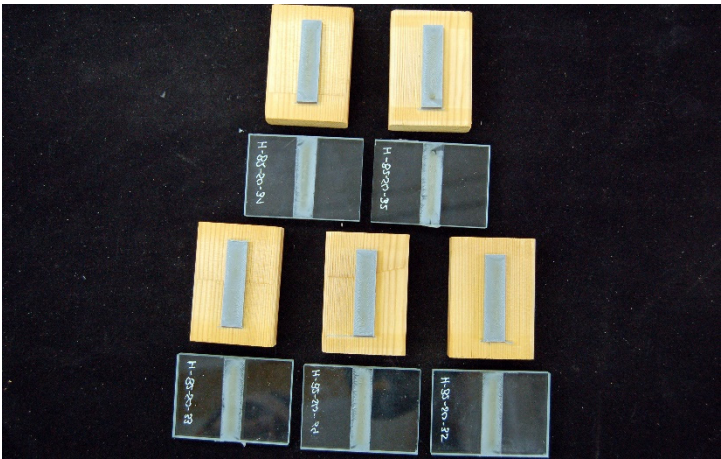


Bild B.96
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	100,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Die Kohäsionsbrüche treten oberflächennah (Glas) auf.

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-SW-31	1094,4	0,3	50,0	12,3	3,0	1,78
H-B2-SW-32	1870,0	0,6	50,0	12,3	3,0	3,05
H-B2-SW-33	1140,6	0,3	50,0	12,3	2,9	1,86
H-B2-SW-34	1481,8	0,5	50,0	12,0	2,9	2,46
H-B2-SW-35	853,9	0,3	50,0	12,2	2,9	1,40
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1288,1	0,4	50,0	12,2	2,9	2,11
Standardabw. σ_x	394,9					0,65
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	316,6					0,51

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Zugversuch nach UV-Bestrahlung für 1000 h (UV2)

Bild B.97

Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

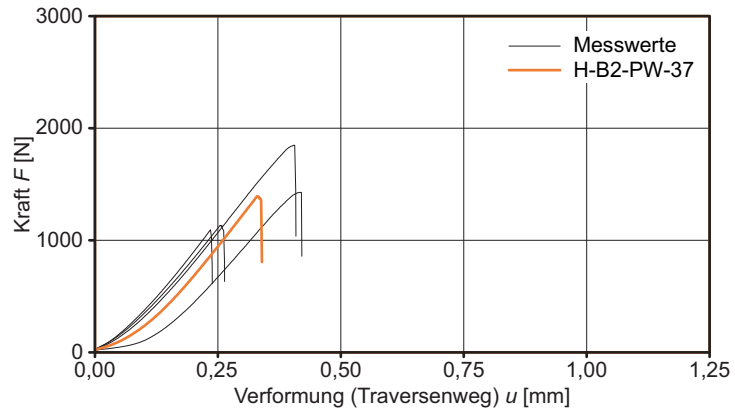
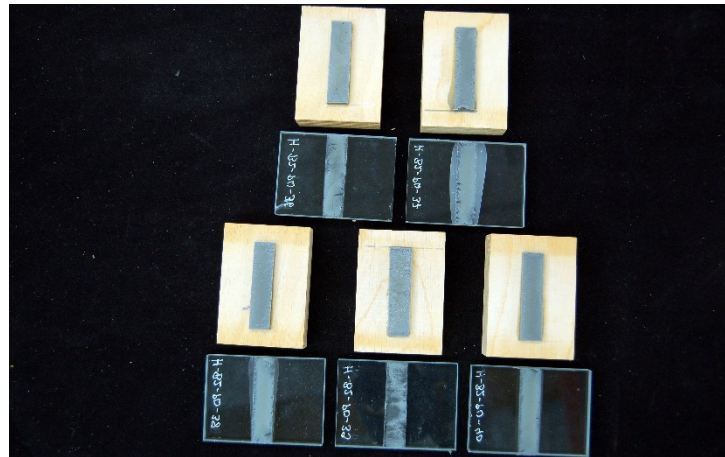


Bild B.98

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	100,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Die Kohäsionsbrüche treten oberflächennah (Glas) auf.



Tafel B.49

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-PW-36	1425,1	0,4	50,0	12,4	2,93	2,31
H-B2-PW-37	1391,0	0,3	50,0	12,0	2,94	2,33
H-B2-PW-38	1130,8	0,3	50,0	12,1	2,95	1,87
H-B2-PW-39	1846,8	0,4	50,0	12,3	2,97	3,00
H-B2-PW-40	1090,6	0,2	50,0	12,3	2,97	1,77
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1376,9	0,3	50,0	12,2	3,0	2,25
Standardabw. σ_X	302,4					0,49
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	632,9					1,06

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch nach UV-Bestrahlung für 1000 h (UV2)

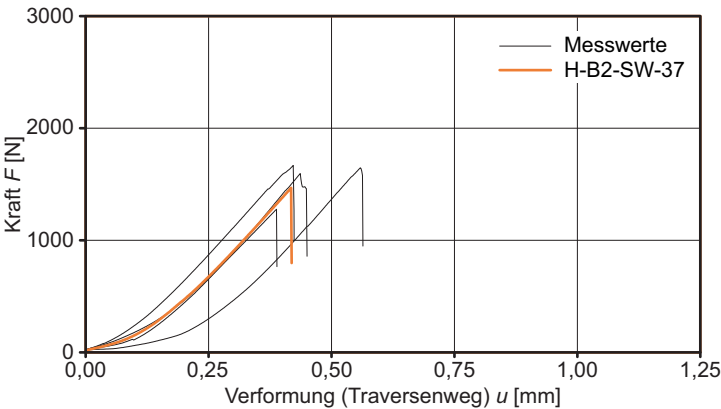


Bild B.99
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

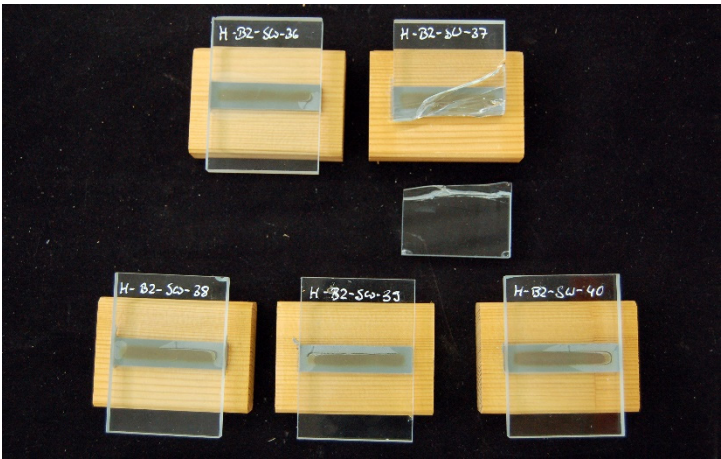


Bild B.100
 Bruchbilder.

Flächenanteile: [%]
 Substratbruch Glas 20,0
 Adhäsion Glas 40,0
 Kohäsion Klebfuge 40,0
 Adhäsion Holz 0,0
 Substratbruch Holz 0,0

Die Kohäsionsbrüche treten oberflächennah (Glas) auf.

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-SW-36	1535,7	0,5	50,0	12,1	2,9	2,55
H-B2-SW-37	1768,5	0,5	50,0	12,1	3,0	2,93
H-B2-SW-38	2040,5	0,5	50,0	12,3	3,0	3,33
H-B2-SW-39	1960,0	0,7	50,0	11,9	2,9	3,29
H-B2-SW-40	1918,3	0,5	50,0	12,0	2,9	3,19
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1844,6	0,5	50,0	12,1	2,9	3,06
Standardabw. $\sigma_{\bar{X}}$	198,9					0,32
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1355,2					2,26

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Zugversuch nach Reinigungsmittellagerung (REI)

Bild B.101

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

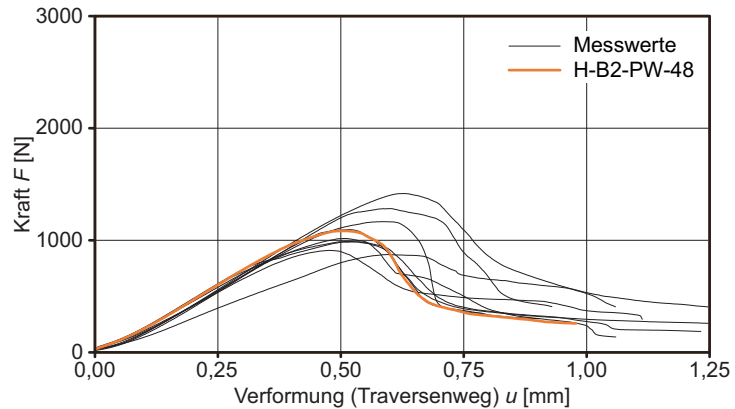


Bild B.102

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	10,0
Substratbruch Holz	90,0



Tafel B.51

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-PW-41	1012,9	0,5	50,0	12,4	2,9	1,64
H-B2-PW-42	1092,8	0,5	50,0	11,9	3,0	1,83
H-B2-PW-43	1280,1	0,6	50,0	12,3	2,8	2,08
H-B2-PW-44	1163,6	0,6	50,0	12,0	2,9	1,94
H-B2-PW-45	869,8	0,6	50,0	11,9	3,1	1,46
H-B2-PW-46	987,1	0,5	50,0	12,0	2,9	1,65
H-B2-PW-47	906,7	0,5	50,0	11,9	3,1	1,52
H-B2-PW-48	1080,9	0,5	50,0	12,1	2,9	1,79
H-B2-PW-49	983,0	0,5	50,0	11,9	3,0	1,65
H-B2-PW-50	1415,1	0,6	50,0	12,0	2,9	2,36
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1079,2	0,5	50,0	12,0	2,9	1,79
Standardabw. σ_X	168,7					0,27
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	724,9					1,22

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch nach Reinigungsmittellagerung (REI)

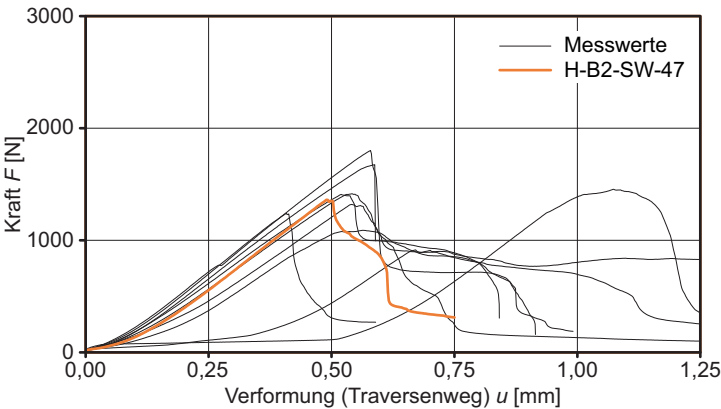


Bild B.103
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.



Bild B.104
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	19,5
Substratbruch Holz	80,5

Tafel B.52

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-SW-41	1799,5	0,6	50,0	12,1	2,9	2,96
H-B2-SW-42	1672,3	0,6	50,0	12,0	2,9	2,79
H-B2-SW-43	1412,6	0,5	50,0	12,0	3,0	2,36
H-B2-SW-44	1453,0	1,1	50,0	12,0	3,0	2,43
H-B2-SW-45	1406,3	0,5	50,0	12,0	3,0	2,35
H-B2-SW-46	1317,9	0,5	50,0	12,1	3,0	2,18
H-B2-SW-47	1358,7	0,5	50,0	12,2	2,9	2,24
H-B2-SW-48	911,3	0,7	50,0	12,2	2,9	1,50
H-B2-SW-49	1237,2	0,4	50,0	12,1	2,9	2,05
H-B2-SW-50	1085,9	0,6	50,0	12,3	3,0	1,77
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1365,5	0,6	50,0	12,1	2,9	2,26
Standardabw. $\sigma_{\bar{X}}$	257,6					0,43
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	824,5					1,35

B – nolax C44.8505 – Sperrholz
Zugversuch nach Befeuchtung +20 °C | 90 % rF (FEU)

Bild B.105

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

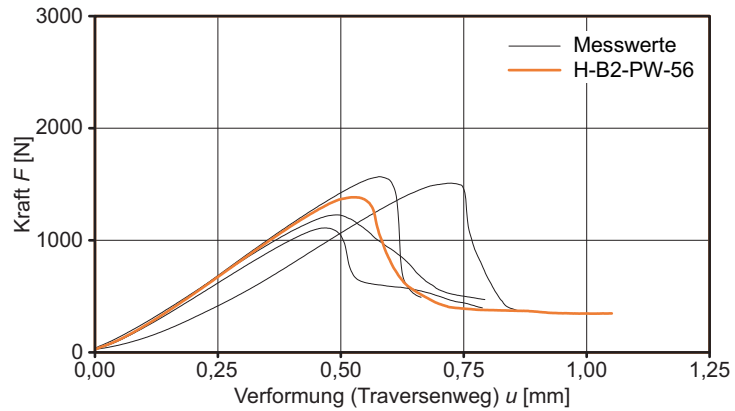
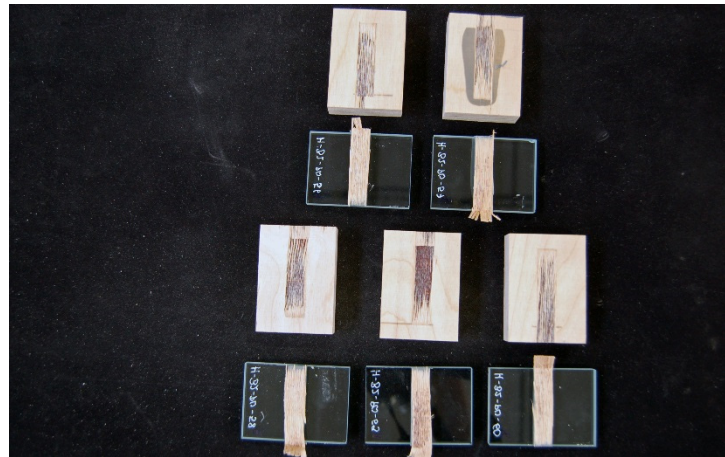


Bild B.106

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	100,0



Tafel B.53

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-PW-56	1381,4	0,53	50,0	11,9	2,9	2,32
H-B2-PW-57	1507,4	0,73	50,0	11,9	3,0	2,53
H-B2-PW-58	1107,3	0,47	50,0	12,2	3,0	1,82
H-B2-PW-59	1565,3	0,58	50,0	12,0	2,9	2,61
H-B2-PW-60	1224,2	0,49	50,0	12,0	3,0	2,04
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1357,1	0,6	50,0	12,0	3,0	2,26
Standardabw. σ_X	191,5					0,33
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	886,1					1,45

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch nach Befeuchtung +20 °C | 90 % rF (FEU)

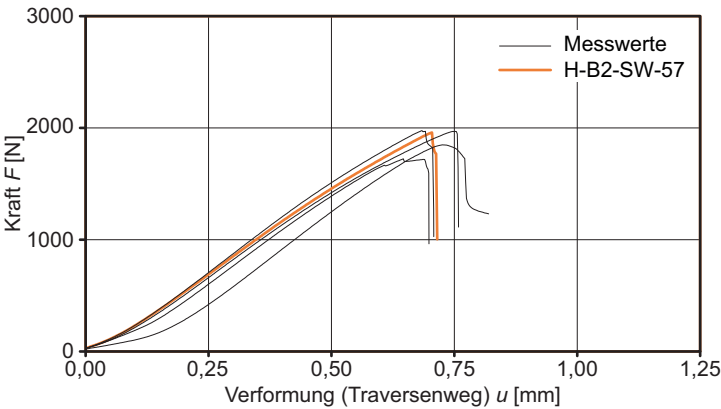


Bild B.107
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

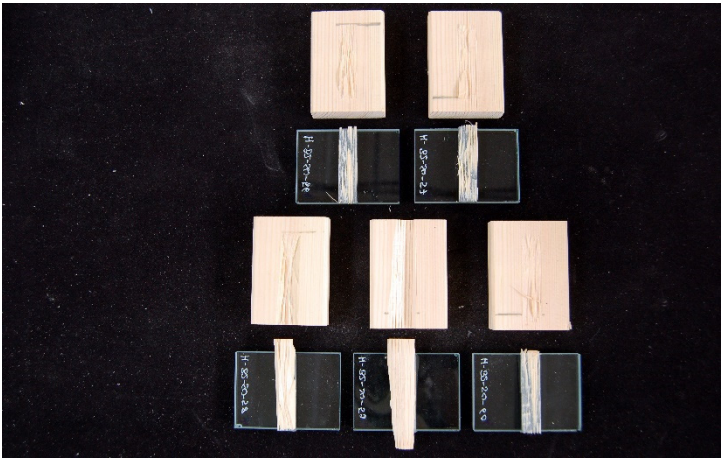


Bild B.108
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	16,0
Substratbruch Holz	84,0

Tafel B.54

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-SW-56	1722,4	0,6	50,0	12,1	2,9	2,84
H-B2-SW-57	1957,1	0,7	50,0	12,2	3,1	3,22
H-B2-SW-58	1846,8	0,7	50,0	12,1	2,9	3,06
H-B2-SW-59	1967,6	0,8	50,0	12,3	2,9	3,19
H-B2-SW-60	1973,4	0,7	50,0	12,0	3,0	3,29
Mittelwert X_{mean}	1893,5	0,7	50,0	12,1	3,0	3,12
Standardabw. σ_X	108,8					0,18
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1625,7					2,68

B – nolax C44.8505 – Sperrholz
Zugversuch nach Trocknung +20 °C | < 30 % rF (TRO)

Bild B.109

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

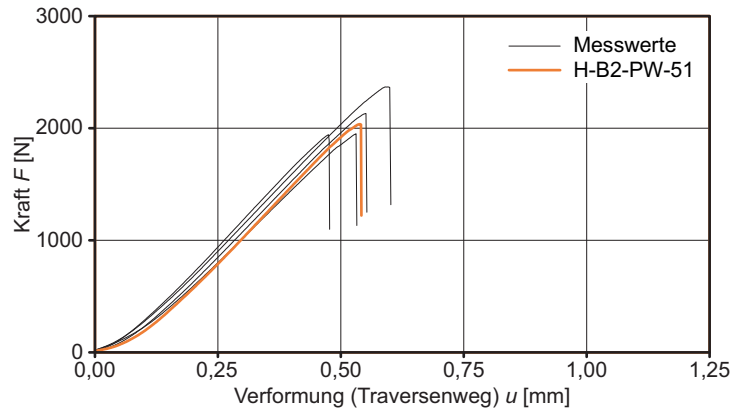


Bild B.110

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	100,0



Tafel B.55

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-PW-51	2034,3	0,5	50,0	12,2	3,0	3,34
H-B2-PW-52	2130,4	0,6	50,0	12,0	2,9	3,55
H-B2-PW-53	1940,3	0,5	50,0	12,0	2,9	3,23
H-B2-PW-54	1948,6	0,5	50,0	11,9	3,0	3,26
H-B2-PW-55	2367,0	0,6	50,0	12,2	2,9	3,88
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2084,1	0,5	50,0	12,1	2,9	3,45
Standardabw. σ_X	175,9					0,27
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{0,5}$	1651,5					2,79

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch nach Trocknung +20 °C | < 30 % rF (TRO)

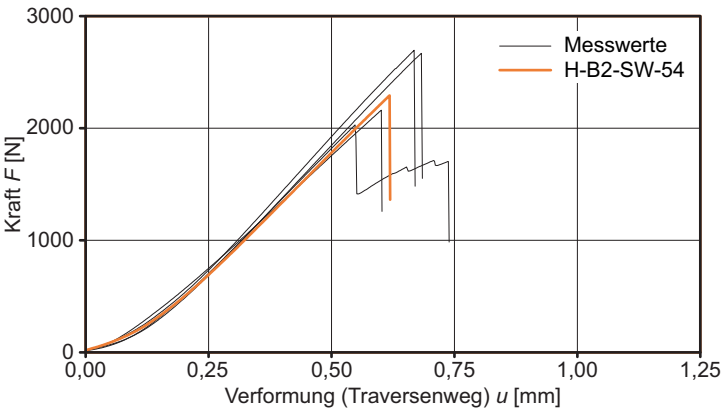


Bild B.111
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

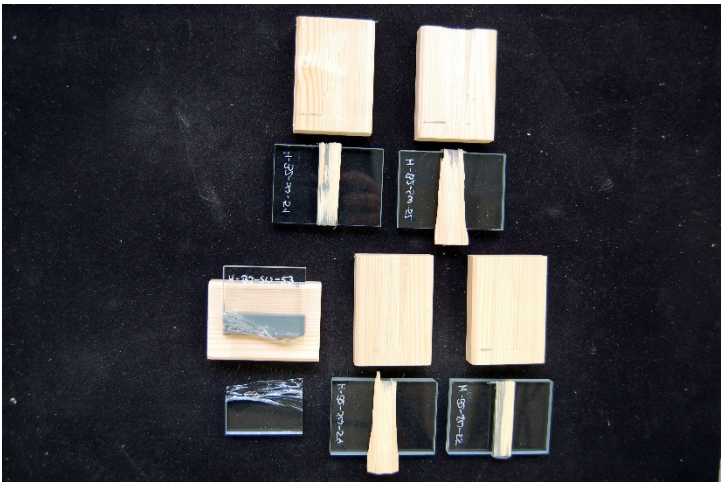


Bild B.112
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	20,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	12,0
Substratbruch Holz	68,0

Tafel B.56

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft <i>F</i> _{max} [kN]	Verformung <i>u</i> [mm]	Länge <i>l</i> [mm]	Breite <i>b</i> [mm]	Dicke <i>d</i> [mm]	Spannung <i>σ</i> _{max} [N/mm²]
H-B2-SW-51	2667,7	0,7	50,0	12,1	3,0	4,42
H-B2-SW-52	2027,6	0,5	50,0	12,2	3,0	3,32
H-B2-SW-53	2694,8	0,7	50,0	12,2	3,0	4,42
H-B2-SW-54	2291,1	0,6	50,0	12,3	3,0	3,74
H-B2-SW-55	2159,3	0,6	50,0	12,3	3,0	3,52
Mittelwert <i>X</i> _{mean}	2368,1	0,6	50,0	12,2	3,0	3,89
Standardabw. <i>σ_x</i>	300,8					0,51
Exzentrizität <i>z</i> _{uβ}	2,46					2,46
5 %-Quantil <i>R</i> _{u,5}	1628,0					2,62

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Zugversuch nach SO₂-Lagerung (SO₂)

Bild B.113

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

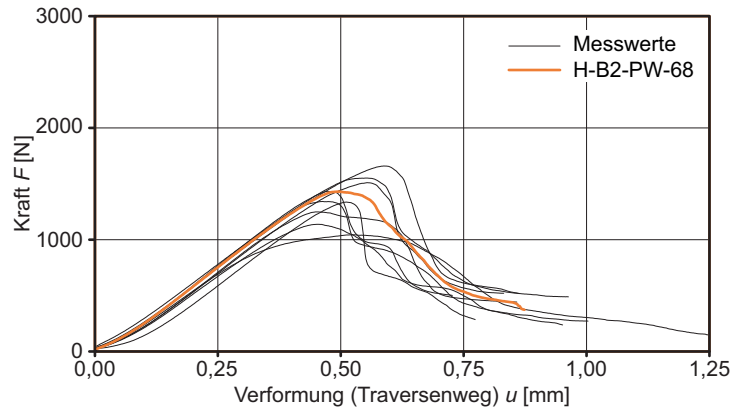
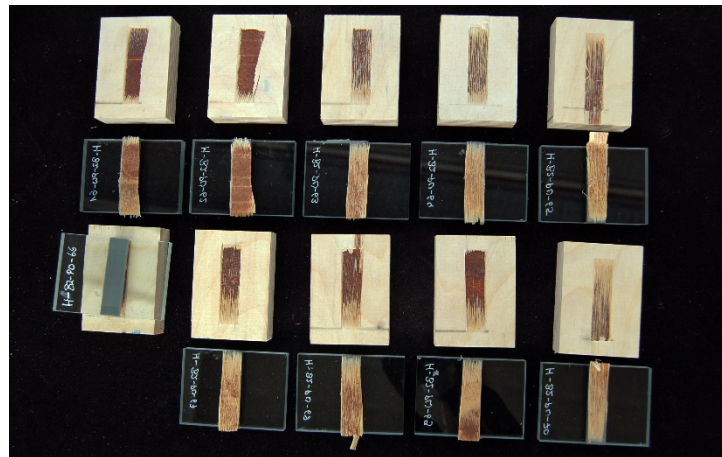


Bild B.114

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	100,0



Tafel B.57

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-B2-PW-61	1041,3	0,5	50,0	11,8	2,9	1,76
H-B2-PW-62	1134,7	0,5	50,0	12,3	2,9	1,84
H-B2-PW-63	1339,1	0,5	50,0	12,1	2,9	2,21
H-B2-PW-64	1333,8	0,5	50,0	12,0	2,9	2,22
H-B2-PW-65	1507,4	0,6	50,0	12,0	3,0	2,52
H-B2-PW-66	1246,0	0,5	50,0	12,1	3,0	2,06
H-B2-PW-67	1657,2	0,6	50,0	12,2	2,9	2,71
H-B2-PW-68	1427,8	0,5	50,0	12,0	3,0	2,39
H-B2-PW-69	1430,1	0,5	50,0	12,1	3,0	2,36
H-B2-PW-70	1549,0	0,6	50,0	12,0	2,9	2,58
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1366,7	0,5	50,0	12,1	2,9	2,27
Standardabw. σ_x	188,9					0,31
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	969,9					1,61

B – nolax C44.8505 – Vollholz
Zugversuch nach SO₂-Lagerung (SO₂)

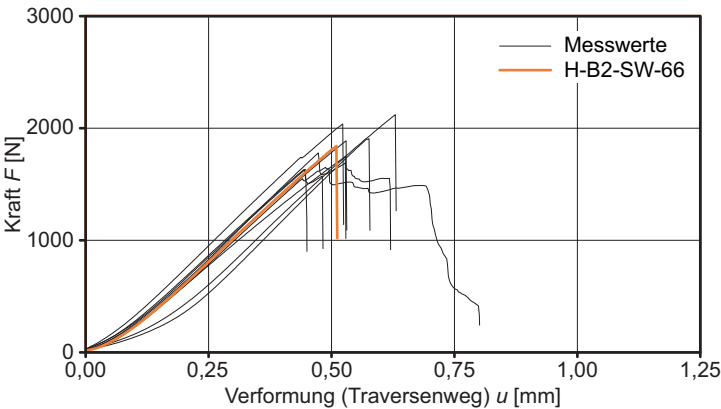


Bild B.115
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.



Bild B.116
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	11,5
Substratbruch Holz	88,5

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft <i>F</i> _{max} [kN]	Verformung <i>u</i> [mm]	Länge <i>l</i> [mm]	Breite <i>b</i> [mm]	Dicke <i>d</i> [mm]	Spannung <i>σ</i> _{max} [N/mm ²]
H-B2-SW-61	1649,1	0,5	50,0	12,2	2,9	2,70
H-B2-SW-62	1885,8	0,5	50,0	12,3	2,7	3,07
H-B2-SW-63	1630,5	0,4	50,0	12,2	2,9	2,67
H-B2-SW-64	1903,9	0,6	50,0	12,3	2,9	3,11
H-B2-SW-65	1778,1	0,5	50,0	12,1	2,8	2,94
H-B2-SW-66	1838,3	0,5	50,0	12,2	2,9	3,01
H-B2-SW-67	1745,1	0,5	50,0	12,2	2,9	2,87
H-B2-SW-68	2036,1	0,5	50,0	12,1	2,9	3,37
H-B2-SW-69	2118,6	0,6	50,0	12,2	3,0	3,47
H-B2-SW-70	1628,9	0,4	50,0	12,2	3,0	2,67
Mittelwert <i>X</i> _{mean}	1821,5	0,5	50,0	12,2	2,9	2,99
Standardabw. <i>σ</i> _x	168,8					0,28
Exzentrizität <i>τ</i> _{αβ}	2,10					2,10
5 %-Quantil <i>R</i> _{u,5}	1466,9					2,40

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Zugversuch bei -20 °C

Bild B.117

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

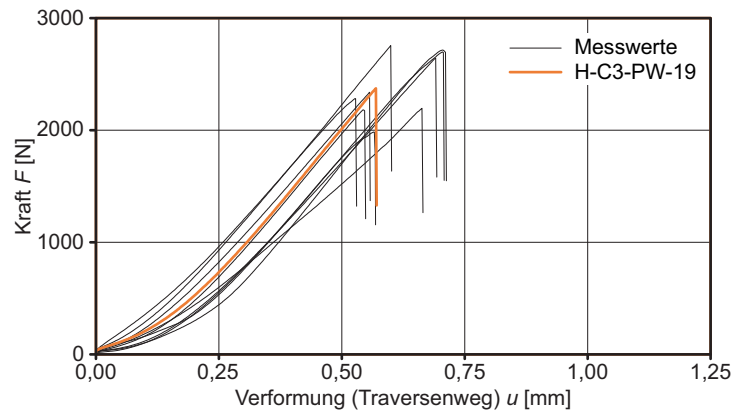
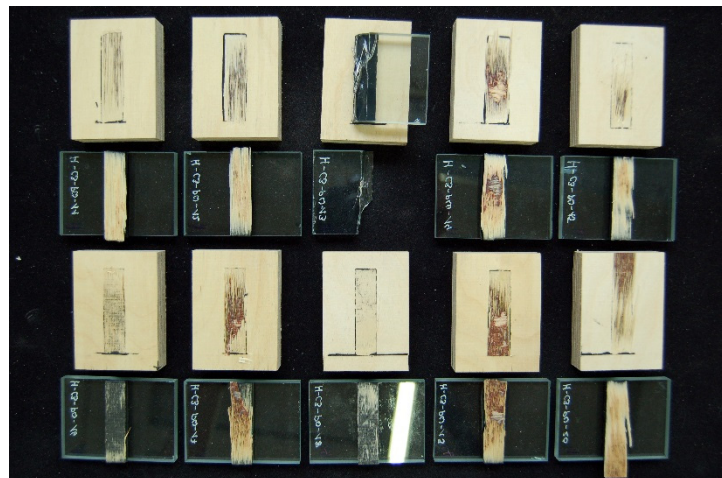


Bild B.118

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	10,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	18,5
Substratbruch Holz	71,5



Tafel B.59

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-11	2642,2	0,7	50,0	12,2	3,1	4,32
H-C3-PW-12	2755,0	0,6	50,0	12,1	2,9	4,57
H-C3-PW-13	2337,5	0,6	50,0	12,3	3,1	3,81
H-C3-PW-14	2194,4	0,7	50,0	12,0	3,0	3,65
H-C3-PW-15	2280,8	0,5	50,0	12,0	3,1	3,79
H-C3-PW-16	2697,6	0,7	50,0	12,2	3,0	4,43
H-C3-PW-17	1982,4	0,6	50,0	12,2	3,0	3,24
H-C3-PW-18	2714,8	0,7	50,0	12,1	3,0	4,50
H-C3-PW-19	2372,5	0,6	50,0	12,2	3,1	3,89
H-C3-PW-20	2180,4	0,5	50,0	12,2	3,1	3,58
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2415,8	0,6	50,0	12,1	3,0	3,98
Standardabw. σ_X	269,5					0,45
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{0,5}$	1849,9					3,03

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch bei -20 °C

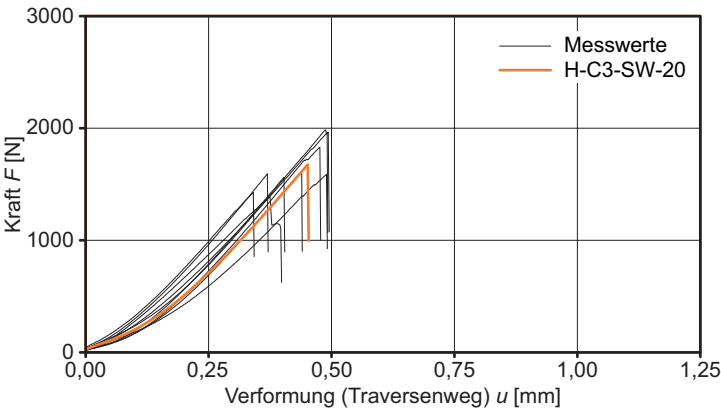


Bild B.119
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

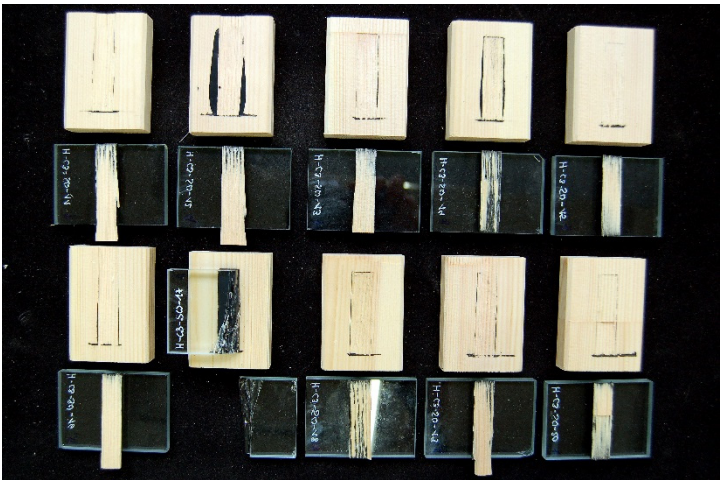


Bild B.120
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	10,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	7,0
Substratbruch Holz	83,0

Tafel B.60

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft <i>F</i> _{max} [kN]	Verformung <i>u</i> [mm]	Länge <i>l</i> [mm]	Breite <i>b</i> [mm]	Dicke <i>d</i> [mm]	Spannung <i>σ</i> _{max} [N/mm ²]
H-C3-SW-11	1605,5	0,4	50,0	12,4	2,9	2,59
H-C3-SW-12	1386,7	0,4	50,0	12,1	3,1	2,30
H-C3-SW-13	1591,1	0,4	50,0	12,2	3,1	2,61
H-C3-SW-14	1983,9	0,5	50,0	12,2	3,0	3,25
H-C3-SW-15	1559,5	0,4	50,0	12,0	3,0	2,60
H-C3-SW-16	1425,0	0,3	50,0	12,3	3,0	2,31
H-C3-SW-17	1958,5	0,5	50,0	12,0	3,0	3,26
H-C3-SW-18	1826,8	0,5	50,0	12,3	3,0	2,97
H-C3-SW-19	1587,1	0,5	50,0	12,3	2,9	2,58
H-C3-SW-20	1673,0	0,5	50,0	12,3	3,0	2,72
Mittelwert <i>X</i> _{mean}	1659,7	0,4	50,0	12,2	3,0	2,72
Standardabw. <i>σ_x</i>	204,1					0,34
Exzentrizität <i>τ</i> _{αβ}	2,10					2,10
5 %-Quantil <i>R</i> _{u,5}	1231,0					2,01

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Zugversuch bei +25 °C (REF)

Bild B.121

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

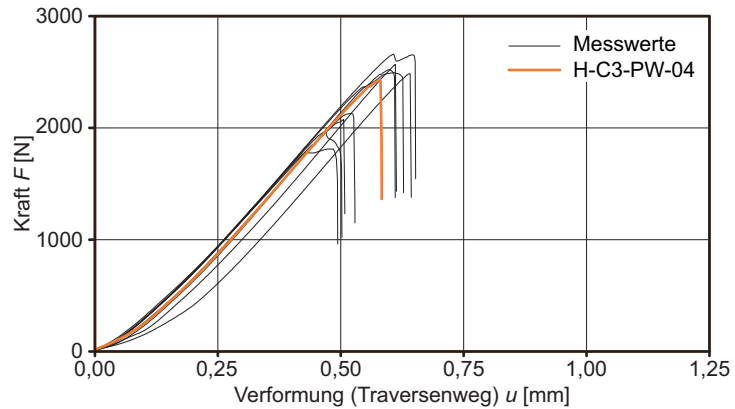
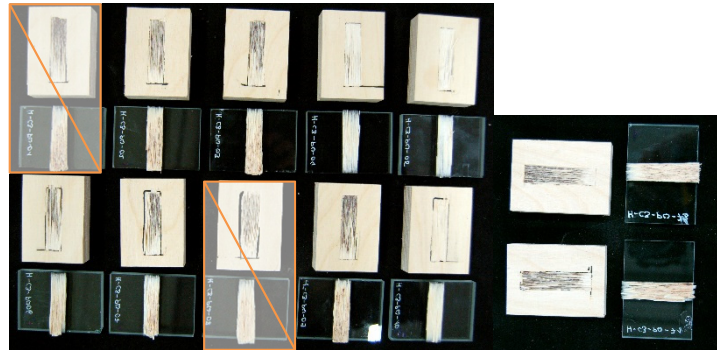


Bild B.122

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	100,0

Prüfkörper 1 und 8 werden
nicht berücksichtigt. Zwei
Zusatzprüfungen.



Tafel B.61

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-01	Prüfkörper verrutscht → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt					
H-C3-PW-02	2521,5	0,6	50,0	12,2	3,0	4,12
H-C3-PW-04	2483,7	0,6	50,0	12,2	3,1	4,06
H-C3-PW-04	2426,6	0,6	50,0	12,2	3,1	3,96
H-C3-PW-05	2074,1	0,5	50,0	12,4	3,1	3,34
H-C3-PW-06	2493,6	0,6	50,0	12,2	3,0	4,08
H-C3-PW-07	2659,0	0,6	50,0	12,1	3,1	4,40
H-C3-PW-08	Prüfkörper verrutscht → Ergebnisse werden nicht berücksichtigt					
H-C3-PW-09	1970,0	0,5	50,0	12,3	3,0	3,21
H-C3-PW-10	2567,4	0,6	50,0	12,2	3,0	4,20
H-C3-PW-71	2127,9	0,5	50,0	12,3	3,0	3,47
H-C3-PW-73	1809,9	0,5	50,0	12,1	3,0	3,00
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2313,4	0,6	50,0	12,2	3,0	3,79
Standardabw. σ_x	291,5					0,48
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1701,2					2,77

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch bei +25 °C (REF)

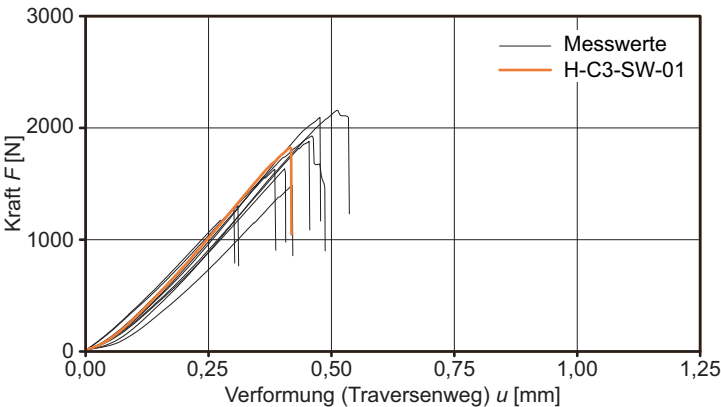


Bild B.123
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

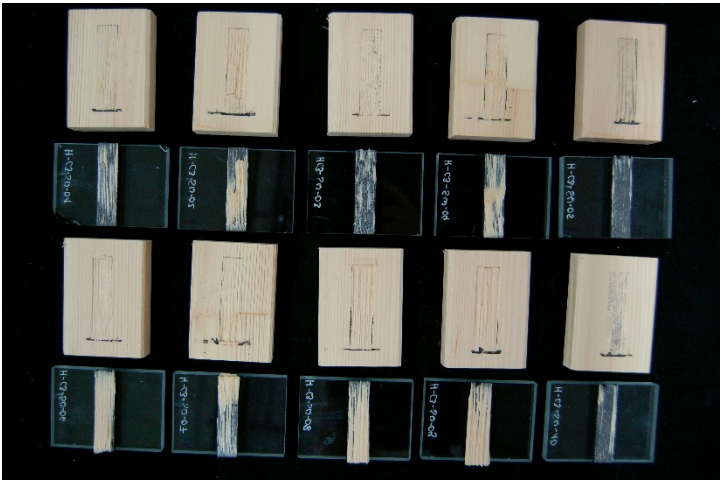


Bild B.124
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	38,5
Substratbruch Holz	61,5

Tafel B.62

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft <i>F</i> _{max} [kN]	Verformung <i>u</i> [mm]	Länge <i>l</i> [mm]	Breite <i>b</i> [mm]	Dicke <i>d</i> [mm]	Spannung <i>σ</i> _{max} [N/mm ²]
H-C3-SW-01	1.824,1	0,4	50,0	12,2	3,1	3,00
H-C3-SW-02	1.926,5	0,5	50,0	12,1	3,0	3,19
H-C3-SW-03	1.628,3	0,4	50,0	12,2	3,1	2,67
H-C3-SW-04	2.156,3	0,5	50,0	12,2	3,1	3,54
H-C3-SW-05	1.879,4	0,5	50,0	12,0	3,0	3,15
H-C3-SW-06	1.300,7	0,3	50,0	12,1	2,9	2,15
H-C3-SW-07	2.092,3	0,5	50,0	12,1	3,0	3,47
H-C3-SW-08	1.633,1	0,4	50,0	12,2	3,0	2,69
H-C3-SW-09	1.483,8	0,4	50,0	12,0	3,0	2,48
H-C3-SW-10	1.278,9	0,3	50,0	12,2	2,9	2,09
Mittelwert <i>X</i> _{mean}	1720,3	0,4	50,0	12,1	3,0	2,84
Standardabw. <i>σ</i> _x	307,3					0,51
Exzentrizität <i>τ</i> _{αβ}	2,14					2,14
5 %-Quantil <i>R</i> _{u,5}	1062,7					1,75

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Zugversuch bei +80 °C

Bild B.125

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

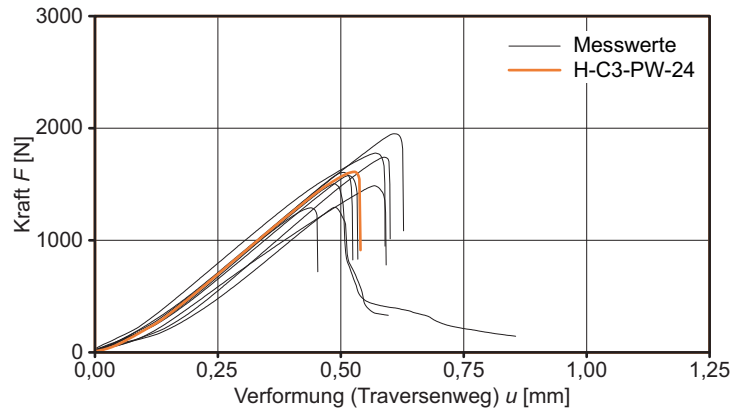
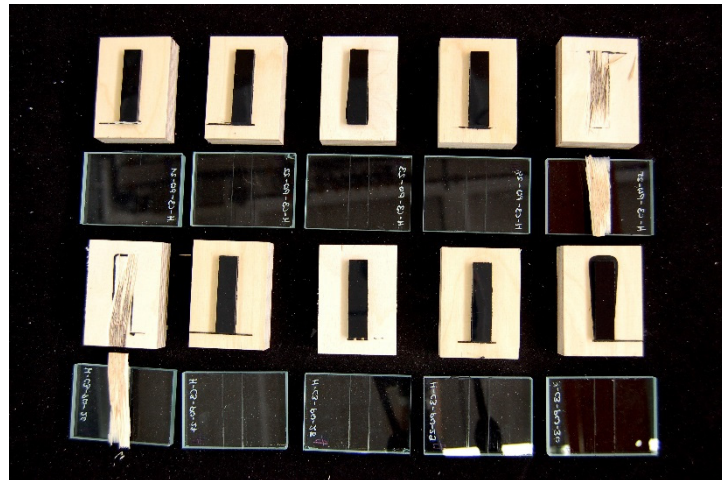


Bild B.126

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	84,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	16,0

Die beiden Prüfkörper, bei
den Holzbruch auftritt, zei-
gen ebenfalls Ablösungen
auf der Glasseite, die mit je
20 % in die Bewertung ein-
gehen.



Tafel B.63

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-21	1484,5	0,6	50,0	12,3	2,9	2,41
H-C3-PW-22	1949,2	0,6	50,0	12,3	3,0	3,18
H-C3-PW-23	1503,1	0,5	50,0	12,2	2,9	2,47
H-C3-PW-24	1608,8	0,5	50,0	12,3	2,9	2,62
H-C3-PW-25	1287,2	0,4	50,0	12,1	3,0	2,12
H-C3-PW-26	1291,0	0,5	50,0	12,1	3,1	2,13
H-C3-PW-27	1575,3	0,5	50,0	12,3	2,9	2,56
H-C3-PW-28	1603,2	0,5	50,0	12,2	3,0	2,64
H-C3-PW-29	1739,6	0,6	50,0	12,2	3,0	2,86
H-C3-PW-30	1776,1	0,6	50,0	12,2	3,1	2,92
Mittelwert X_{mean}	1581,8	0,5	50,0	12,2	3,0	2,59
Standardabw. σ_X	207,1					0,33
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1147,0					1,89

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch bei +80 °C

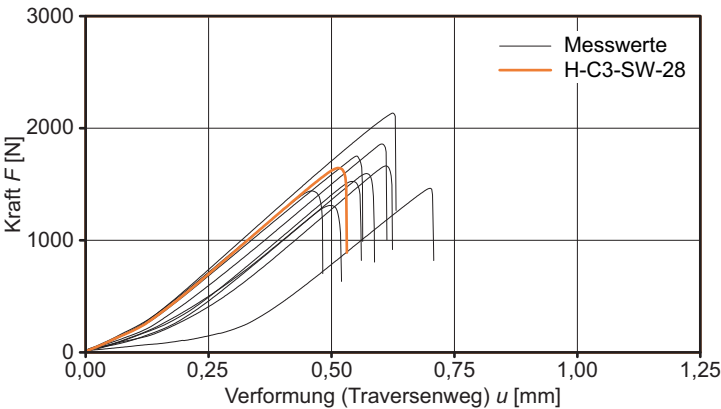


Bild B.127
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.



Bild B.128
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	75,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	25,0
Substratbruch Holz	0,0

Drei der vier Prüfkörper, bei den Holzbruch auftritt, zeigen ebenfalls Ablösungen auf der Glasseite, die mit je 50 % in die Bewertung eingehen.

Tafel B.64

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-SW-21	1.461,9	0,7	50,0	12,0	3,0	2,43
H-C3-SW-22	1.593,3	0,6	50,0	12,2	3,0	2,62
H-C3-SW-23	1.437,7	0,5	50,0	12,1	3,0	2,38
H-C3-SW-24	1.308,0	0,5	50,0	12,1	2,9	2,16
H-C3-SW-25	1.661,7	0,6	50,0	12,1	3,0	2,75
H-C3-SW-26	1.857,2	0,6	50,0	12,2	3,0	3,05
H-C3-SW-27	2.133,9	0,6	50,0	12,1	2,9	3,54
H-C3-SW-28	1.642,7	0,5	50,0	12,2	2,9	2,70
H-C3-SW-29	1.522,9	0,5	50,0	12,2	2,9	2,50
H-C3-SW-30	1.749,3	0,6	50,0	12,1	3,0	2,90
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1636,9	0,6	50,0	12,1	3,0	2,70
Standardabw. $\sigma_{\bar{X}}$	236,2					0,39
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1140,8					1,88

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz

Zugversuch nach UV- Bestrahlung für 500 h (UV1)

Bild B.129

Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

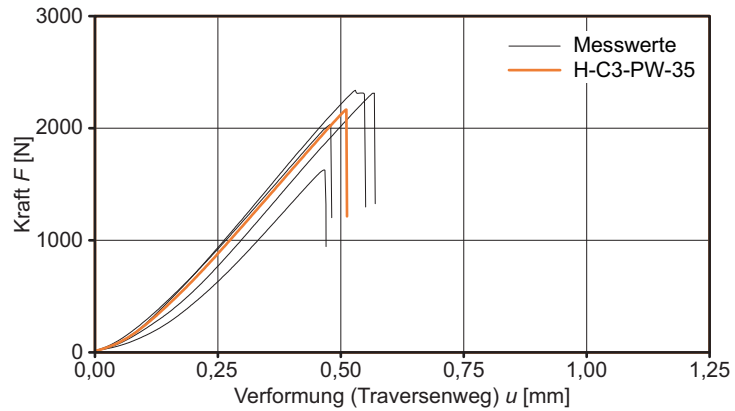


Bild B.130

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	100,0



Tafel B.65

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-31	1626,2	0,5	50,0	12,0	3,1	2,70
H-C3-PW-32	2337,5	0,5	50,0	12,1	3,1	3,85
H-C3-PW-33	2032,9	0,5	50,0	12,2	3,0	3,33
H-C3-PW-34	2311,7	0,6	50,0	12,1	3,0	3,81
H-C3-PW-35	2165,0	0,5	50,0	12,1	3,0	3,59
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2094,7	0,5	50,0	12,1	3,0	3,46
Standardabw. σ_X	289,1					0,47
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1383,5					2,30

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch nach UV- Bestrahlung für 500 h (UV1)

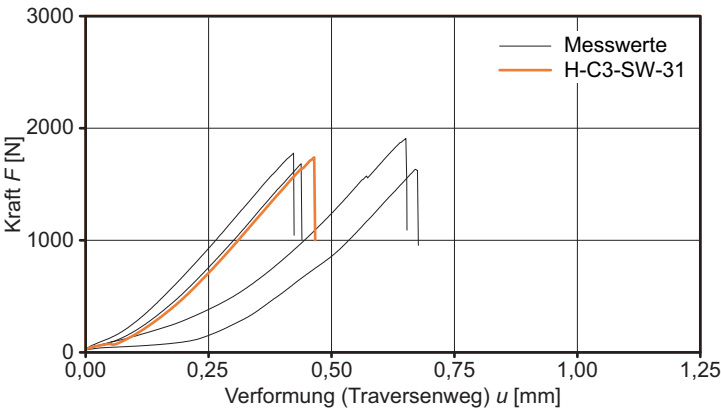


Bild B.131
 Kraft-Verformungs-
 Diagramm mit Markierung
 eines repräsentativen
 Prüfkörpers.

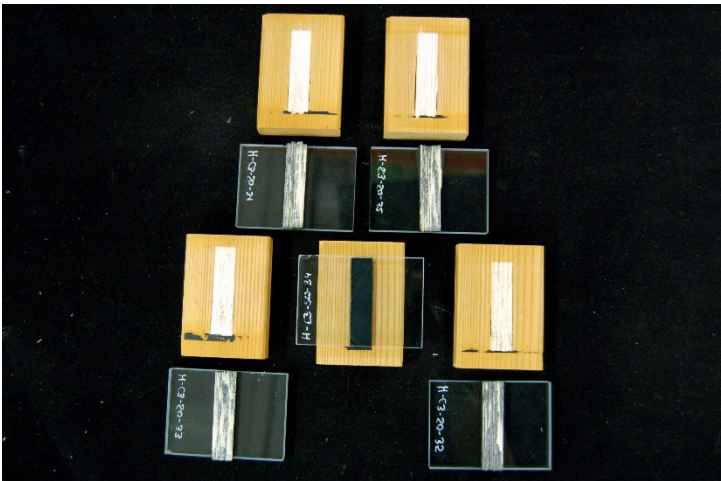


Bild B.132
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	44,0
Substratbruch Holz	56,0

Tafel B.66

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft <i>F</i> _{max} [kN]	Verformung <i>u</i> [mm]	Länge <i>l</i> [mm]	Breite <i>b</i> [mm]	Dicke <i>d</i> [mm]	Spannung <i>σ</i> _{max} [N/mm²]
H-C3-SW-31	1737,6	0,5	50,0	12,3	3,0	2,84
H-C3-SW-32	1680,1	0,4	50,0	12,1	3,0	2,78
H-C3-SW-33	1776,1	0,4	50,0	12,5	3,0	2,85
H-C3-SW-34	1631,3	0,7	50,0	12,0	3,0	2,72
H-C3-SW-35	1907,0	0,7	50,0	12,1	3,0	3,15
Mittelwert <i>X</i> _{mean}	1746,4	0,5	50,0	12,2	3,0	2,87
Standardabw. <i>σ</i> _x	105,3					0,17
Exzentrizität <i>z</i> _{αβ}	2,46					2,46
5 %-Quantil <i>R</i> _{u,5}	1487,3					2,45

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Zugversuch nach UV- Bestrahlung für 1000 h (UV2)

Bild B.133

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

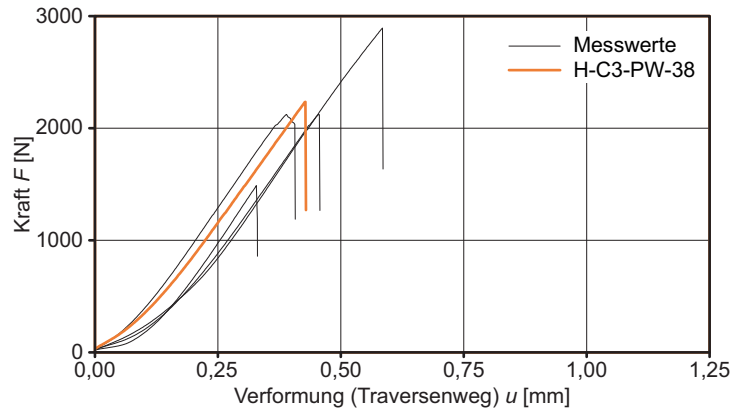


Bild B.134

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	40,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	60,0



Tafel B.67

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-36	2121,5	0,4	50,0	12,2	3,0	3,48
H-C3-PW-37	1486,1	0,3	50,0	12,3	3,0	2,42
H-C3-PW-38	2234,2	0,4	50,0	12,2	3,0	3,66
H-C3-PW-39	2893,9	0,6	50,0	12,4	3,0	4,68
H-C3-PW-40	2120,6	0,5	50,0	12,3	3,0	3,45
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2171,2	0,4	50,0	12,3	3,0	3,54
Standardabw. σ_X	500,2					0,80
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	940,8					1,56

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch nach UV- Bestrahlung für 1000 h (UV2)

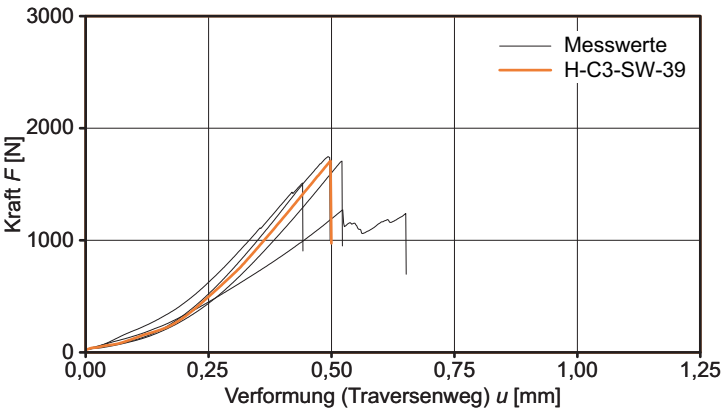


Bild B.135
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

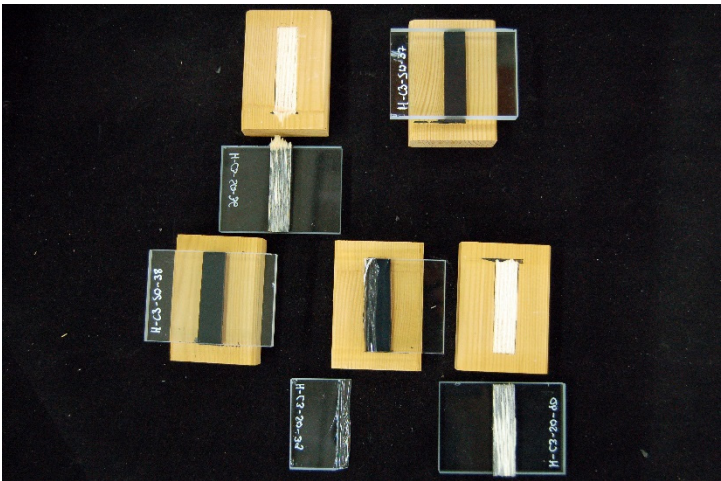


Bild B.136
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	20,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	12,0
Substratbruch Holz	68,0

Tafel B.68

Prüfkörper ID	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Fugengeometrie		Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
				Breite b [mm]	Dicke d [mm]	
H-C3-SW-36	1704,9	0,5	50,0	12,3	2,9	2,78
H-C3-SW-37	1744,5	0,5	50,0	12,1	3,0	2,88
H-C3-SW-38	1268,8	0,5	50,0	12,3	3,0	2,07
H-C3-SW-39	1706,7	0,5	50,0	12,4	3,1	2,76
H-C3-SW-40	1508,7	0,4	50,0	12,2	2,9	2,48
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1586,7	0,5	50,0	12,2	3,0	2,59
Standardabw. $\sigma_{\bar{X}}$	200,3					0,33
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1094,0					1,79

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Zugversuch nach Reinigungsmittellagerung (REI)

Bild B.137

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

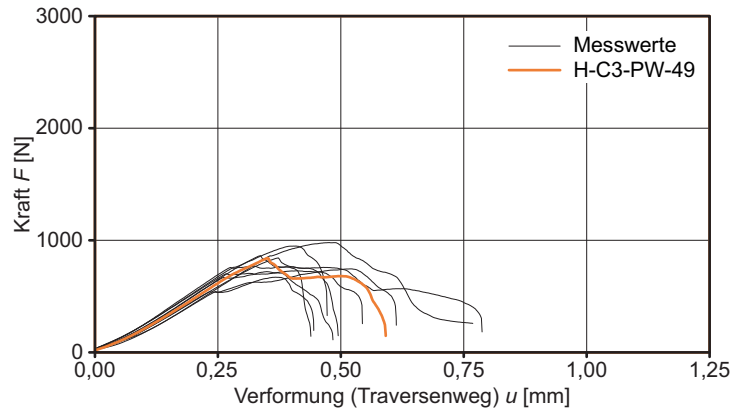
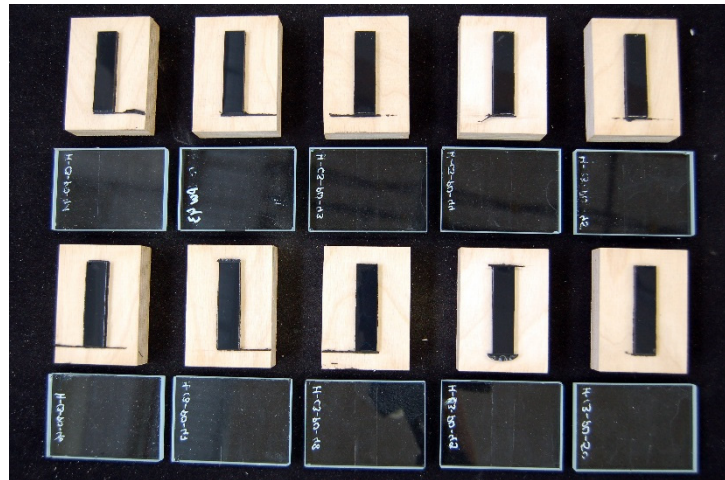


Bild B.138

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	100,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0



Tafel B.69

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-41	741,4	0,5	50,0	12,2	3,0	1,22
H-C3-PW-42	764,8	0,3	50,0	12,2	3,0	1,26
H-C3-PW-43	859,8	0,3	50,0	12,1	3,0	1,42
H-C3-PW-44	839,9	0,4	50,0	12,2	2,9	1,38
H-C3-PW-45	667,0	0,4	50,0	12,1	2,9	1,10
H-C3-PW-46	976,2	0,5	50,0	12,1	3,0	1,62
H-C3-PW-47	705,6	0,4	50,0	12,3	3,0	1,15
H-C3-PW-48	945,0	0,4	50,0	12,1	3,0	1,57
H-C3-PW-49	838,8	0,4	50,0	12,2	3,0	1,38
H-C3-PW-50	724,6	0,4	50,0	12,0	3,0	1,21
Mittelwert \bar{X}_{mean}	806,3	0,4	50,0	12,1	3,0	1,33
Standardabw. σ_X	102,9					0,17
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	590,2					0,97

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch nach Reinigungsmittellagerung (REI)

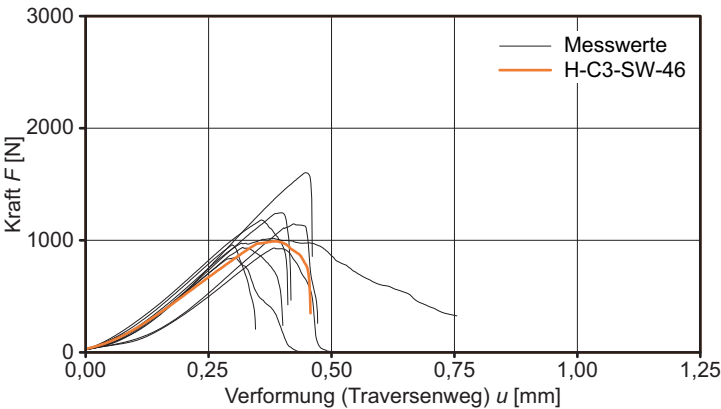


Bild B.139
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

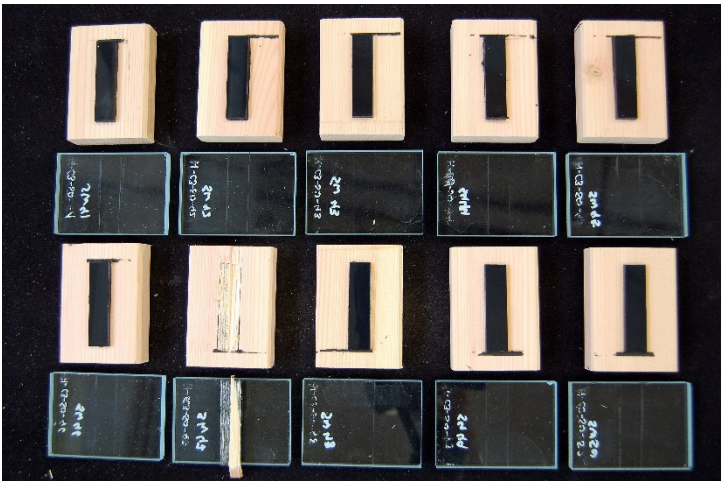


Bild B.140
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	90,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	3,0
Substratbruch Holz	7,0

Tafel B.70

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-SW-41	1.601,01	0,4	50,0	12,09	3,0	2,65
H-C3-SW-42	957,24	0,3	50,0	12,22	3,0	1,57
H-C3-SW-43	840,048	0,3	50,0	12,13	3,0	1,39
H-C3-SW-44	1.178,08	0,4	50,0	12,09	2,9	1,95
H-C3-SW-45	1.143,67	0,4	50,0	12,37	3,0	1,85
H-C3-SW-46	988,28	0,4	50,0	12,12	3,0	1,63
H-C3-SW-47	1.014,13	0,4	50,0	12,04	3,1	1,68
H-C3-SW-48	933,069	0,3	50,0	12,25	2,9	1,52
H-C3-SW-49	927,493	0,4	50,0	12,23	3,0	1,52
H-C3-SW-50	1.242,42	0,4	50,0	12,17	2,9	2,04
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1082,5	0,4	50,0	12,2	3,0	1,78
Standardabw. σ_x	221,5					0,37
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	617,3					1,01

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Zugversuch nach Befeuchtung +20 °C | 90 % rF (FEU)

Bild B.141

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

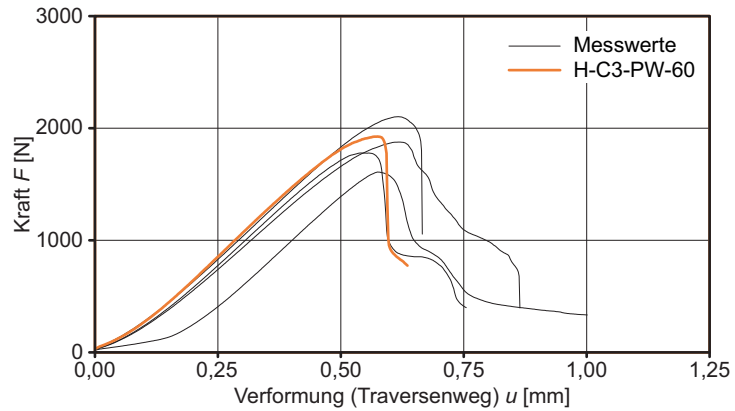
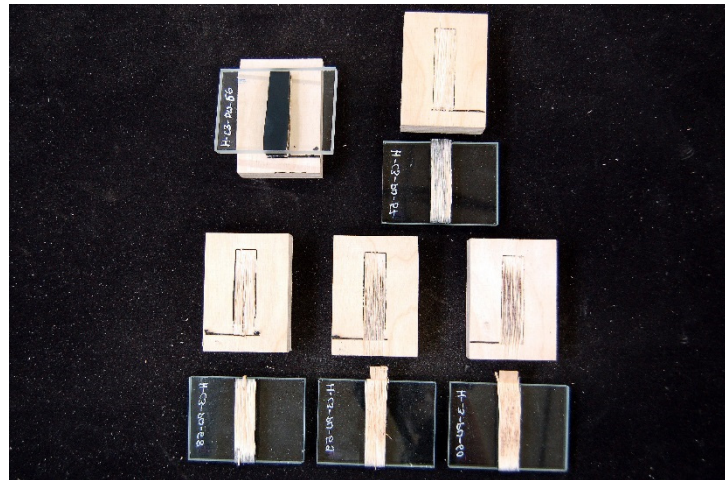


Bild B.142

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	100,0



Tafel B.71

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-56	1607,0	0,6	50,0	12,3	3,0	2,62
H-C3-PW-57	1874,9	0,6	50,0	12,2	3,0	3,08
H-C3-PW-58	2101,4	0,6	50,0	12,1	3,0	3,47
H-C3-PW-59	1777,4	0,5	50,0	12,2	2,9	2,91
H-C3-PW-60	1923,8	0,6	50,0	12,3	2,9	3,13
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1856,9	0,6	50,0	12,2	3,0	3,04
Standardabw. σ_X	182,6					0,31
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1407,7					2,28

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch nach Befeuchtung +20 °C | 90 % rF (FEU)

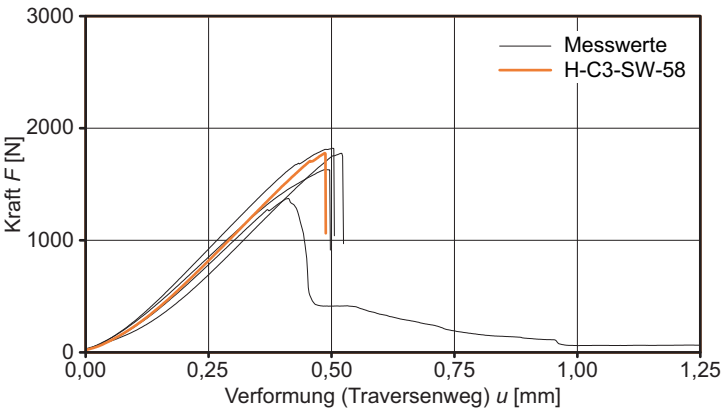


Bild B.143
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

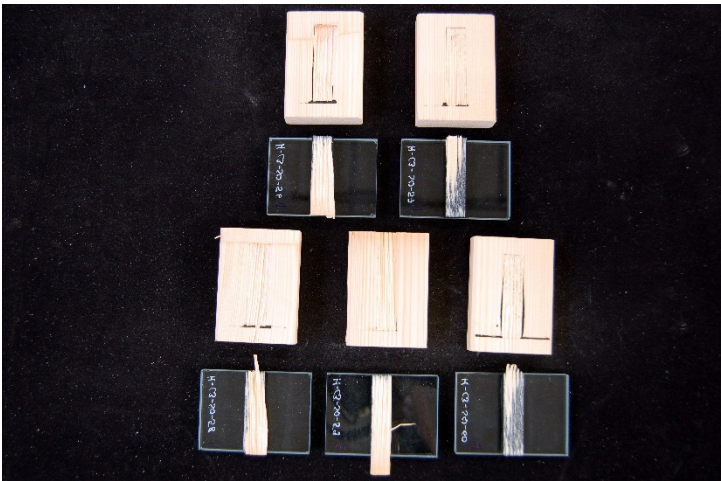


Bild B.144
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	14,0
Substratbruch Holz	86,0

Tafel B.72

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-SW-56	1370,5	0,4	50,0	12,2	3,0	2,24
H-C3-SW-57	1819,5	0,5	50,0	12,2	2,9	2,98
H-C3-SW-58	1776,1	0,5	50,0	12,1	3,0	2,94
H-C3-SW-59	1774,4	0,5	50,0	12,0	3,0	2,95
H-C3-SW-60	1632,4	0,5	50,0	12,2	3,0	2,68
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1674,6	0,5	50,0	12,1	3,0	2,76
Standardabw. $\sigma_{\bar{X}}$	184,1					0,31
Exzentrizität $\bar{z}_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1221,8					1,99

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Zugversuch nach Trocknung +20 °C | < 30 % rF (TRO)

Bild B.145

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

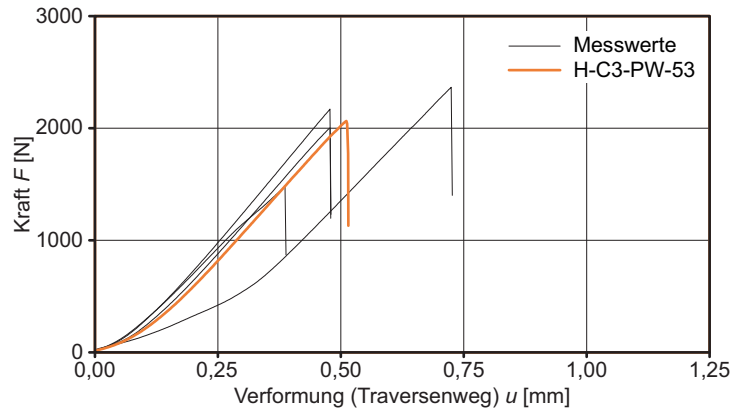
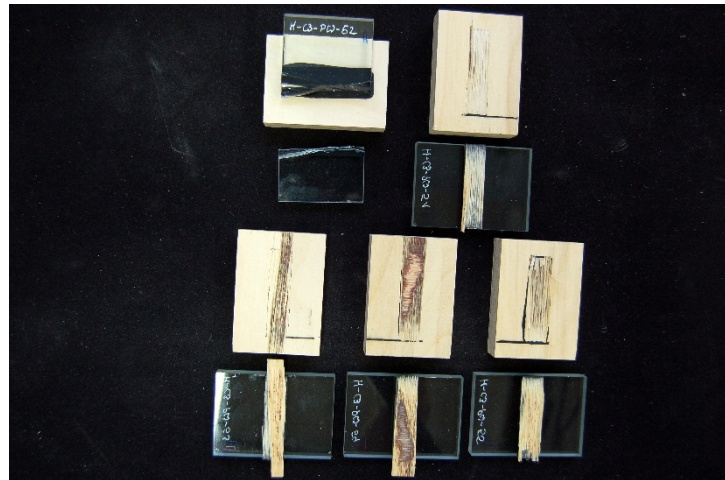


Bild B.146

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	20,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	80,0



Tafel B.73

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-51	2001,1	0,5	50,0	12,1	3,0	3,32
H-C3-PW-52	1479,6	0,4	50,0	12,1	3,0	2,45
H-C3-PW-53	2063,0	0,5	50,0	12,1	2,9	3,40
H-C3-PW-54	2169,6	0,5	50,0	12,1	3,0	3,59
H-C3-PW-55	2364,8	0,7	50,0	12,4	3,1	3,82
Mittelwert \bar{X}_{mean}	2015,6	0,5	50,0	12,2	3,0	3,31
Standardabw. σ_X	329,9					0,52
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1204,0					2,03

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch nach Trocknung +20 °C | < 30 % rF (TRO)

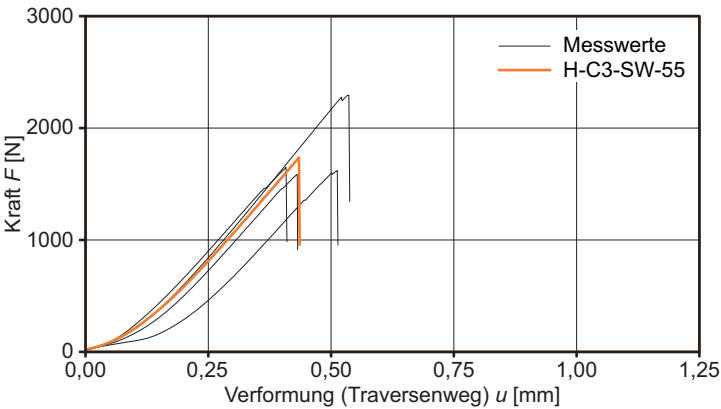


Bild B.147
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.

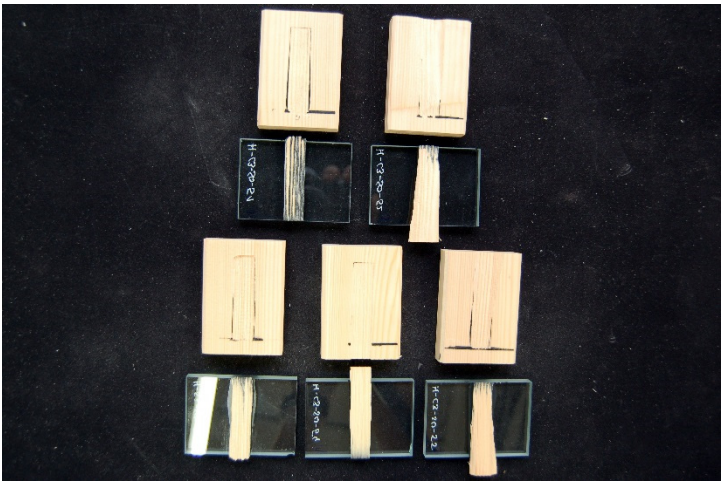


Bild B.148
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	15,0
Substratbruch Holz	85,0

Tafel B.74

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-SW-51	1617,8	0,5	50,0	12,3	2,8	2,64
H-C3-SW-52	1582,2	0,4	50,0	12,2	2,9	2,59
H-C3-SW-53	1646,8	0,4	50,0	12,4	3,0	2,65
H-C3-SW-54	2292,5	0,5	50,0	12,3	2,8	3,73
H-C3-SW-55	1734,9	0,4	50,0	12,3	2,6	2,82
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1774,9	0,5	50,0	12,3	2,8	2,89
Standardabw. $\sigma_{\bar{x}}$	294,8					0,48
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,46					2,46
5 %-Quantil $R_{u,5}$	1049,6					1,71

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz Zugversuch nach SO₂-Lagerung (SO₂)

Bild B.149

Kraft-Verformungs-
Diagramm mit Markierung
eines repräsentativen
Prüfkörpers.

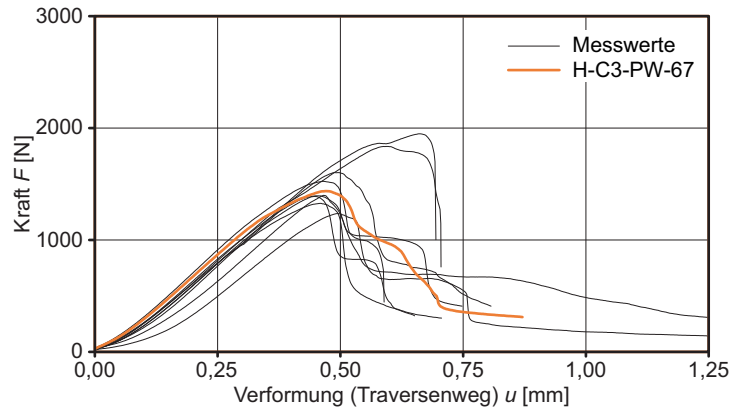
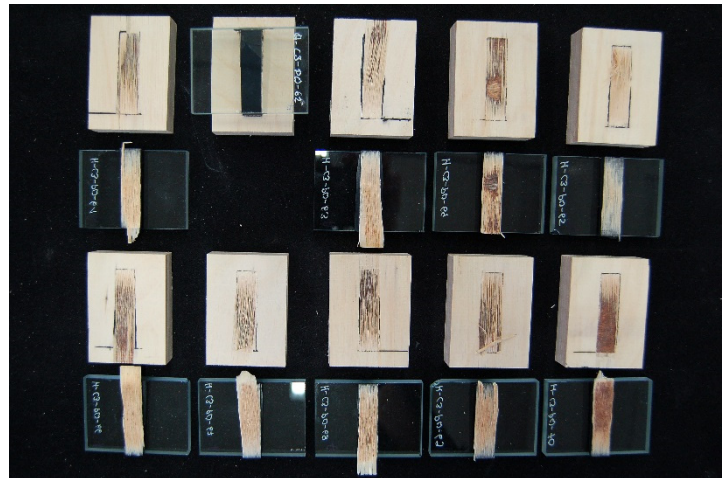


Bild B.150

Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	1,5
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	1,0
Substratbruch Holz	97,5



Tafel B.75

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-PW-61	1232,9	0,5	50,0	12,1	3,0	2,04
H-C3-PW-62	1833,9	0,6	50,0	12,4	3,0	2,97
H-C3-PW-63	1396,2	0,5	50,0	12,0	3,0	2,33
H-C3-PW-64	1600,4	0,5	50,0	12,3	2,9	2,61
H-C3-PW-65	1947,0	0,7	50,0	12,1	3,0	3,22
H-C3-PW-66	1324,5	0,5	50,0	12,1	3,0	2,18
H-C3-PW-67	1434,2	0,5	50,0	12,2	3,1	2,36
H-C3-PW-68	1521,8	0,5	50,0	12,2	3,0	2,50
H-C3-PW-69	1386,1	0,4	50,0	12,5	3,1	2,22
H-C3-PW-70	1392,4	0,5	50,0	12,3	2,9	2,26
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1506,9	0,5	50,0	12,2	3,0	2,47
Standardabw. σ_X	226,9					0,37
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{0,5}$	1030,5					1,69

C – Scotch-Weld DP 490 – Vollholz
Zugversuch nach SO₂-Lagerung (SO₂)

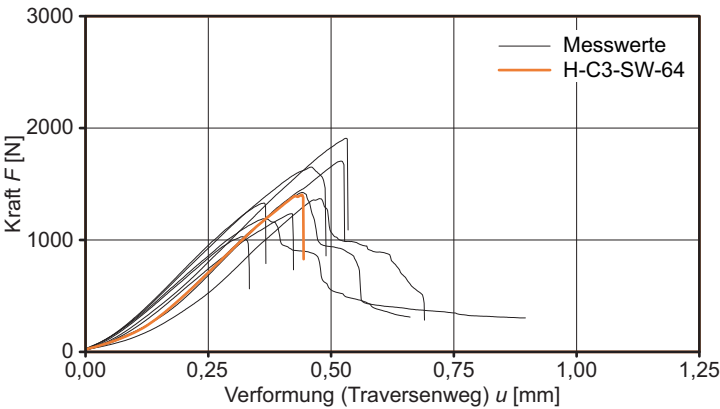


Bild B.151
 Kraft-Verformungs-Diagramm mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers.



Bild B.152
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	42,0
Substratbruch Holz	58,0

Tafel B.76

Prüfkörper ID	Messwerte		Fugengeometrie			
	Kraft F_{\max} [kN]	Verformung u [mm]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Dicke d [mm]	Spannung σ_{\max} [N/mm ²]
H-C3-SW-61	1421,9	0,4	50,0	12,2	3,0	2,34
H-C3-SW-62	1367,4	0,5	50,0	12,1	2,9	2,26
H-C3-SW-63	1906,9	0,5	50,0	12,2	3,0	3,12
H-C3-SW-64	1401,5	0,4	50,0	12,2	3,0	2,30
H-C3-SW-65	1702,6	0,5	50,0	12,2	3,0	2,80
H-C3-SW-66	1186,7	0,4	50,0	12,2	2,9	1,95
H-C3-SW-67	1026,4	0,3	50,0	12,1	2,9	1,70
H-C3-SW-68	1232,0	0,4	50,0	12,2	3,0	2,01
H-C3-SW-69	1649,4	0,5	50,0	12,3	2,9	2,67
H-C3-SW-70	1327,2	0,4	50,0	12,4	3,0	2,15
Mittelwert \bar{X}_{mean}	1422,2	0,4	50,0	12,2	3,0	2,33
Standardabw. σ_x	263,7					0,43
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$	2,10					2,10
5 %-Quantil $R_{u,5}$	868,4					1,43

Übersicht Bruchmuster – Scherversuch

Bild B.153

Übersicht zum Bruchverhalten der Scherprüfkörper vor und nach Alterung.

Klebstoffe:

A - Ottocoll S660

B - nolax C44.8505

C - Scotch-Weld DP 490

Holzart:

BFU Furniersperrholz Birke

VH Vollholz Kiefer

Prüfung vor Alterung:

-20 °C/+25 °C/+80 °C

Prüfung nach Alterung

UV1 Bestrahlung 500 h

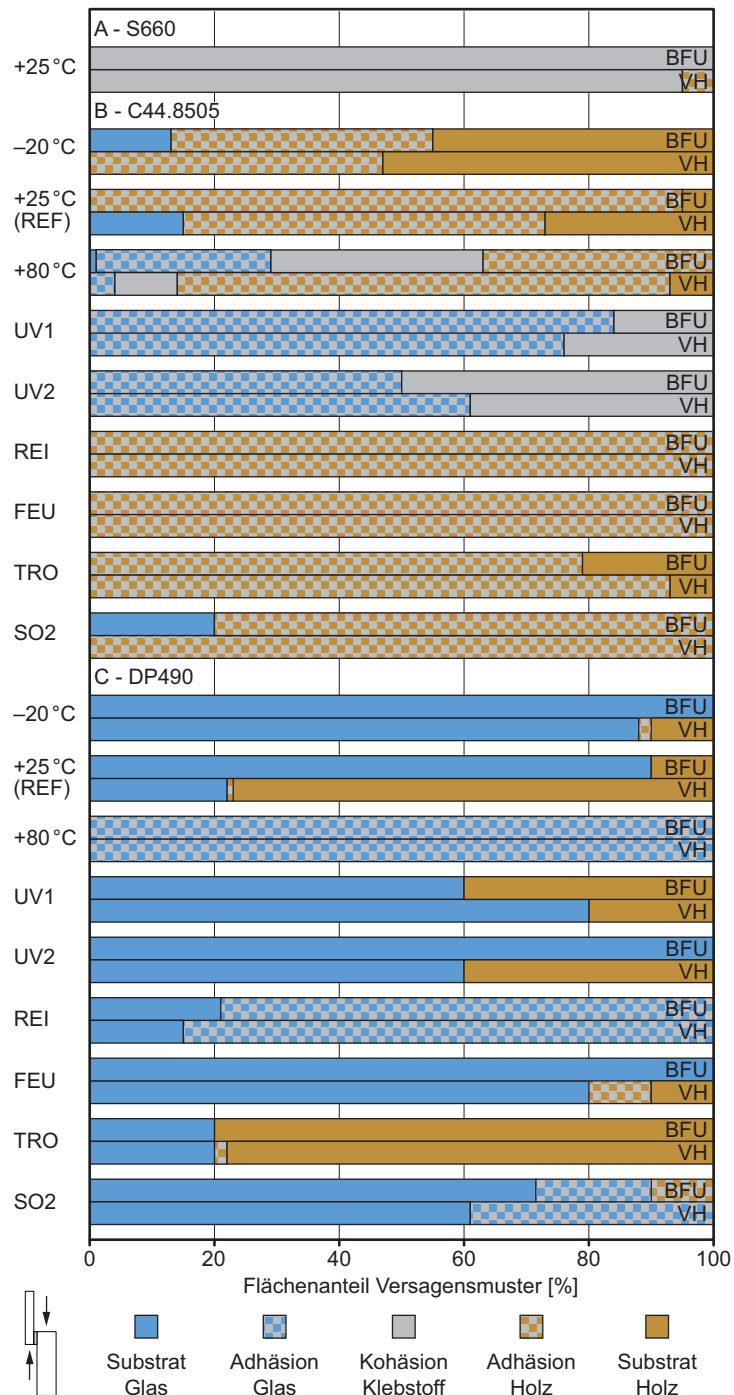
UV2 Bestrahlung 1000 h

REI Reinigungsmittel-lagerung

FEU Befeuchtung bei +20 °C | 90 % rF

TRO Trocknung bei +20 °C | < 30 % rF

SO2 Lagerung in SO₂-haltiger Atmosphäre



Übersicht Bruchmuster – Zugversuch

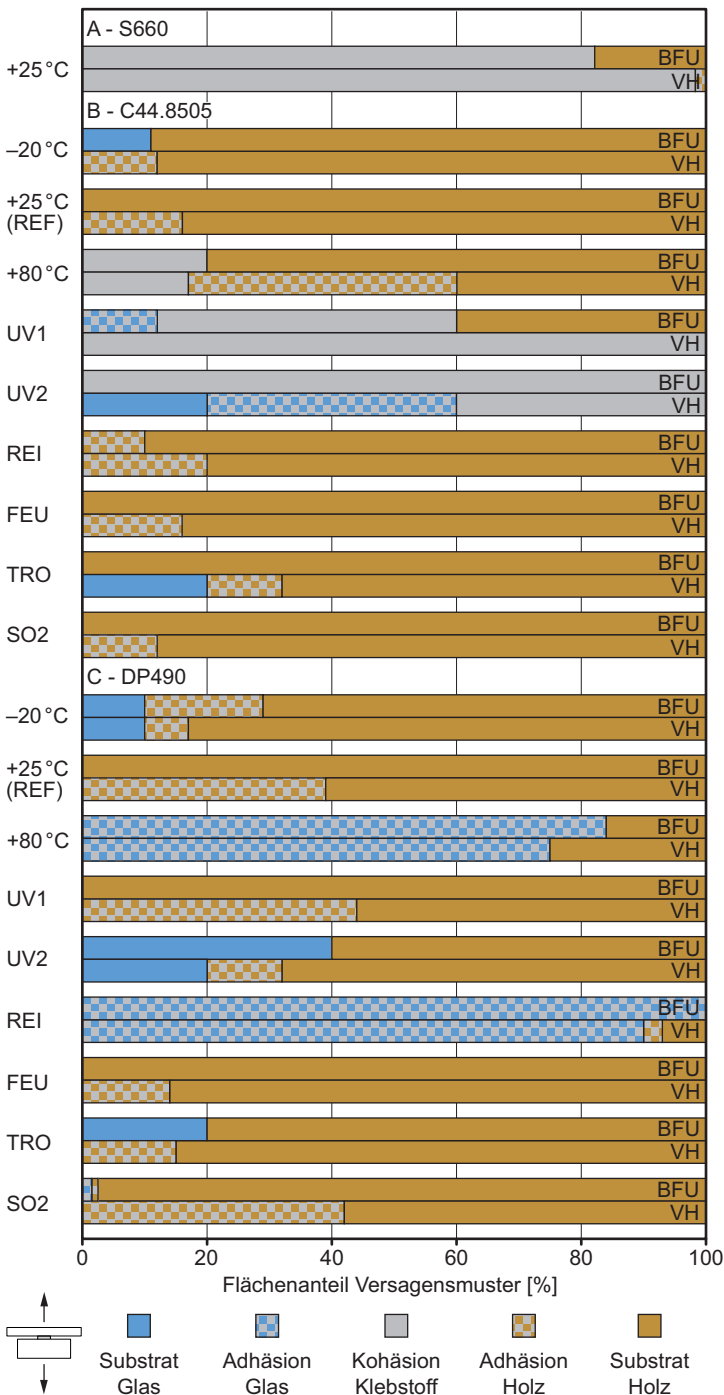


Bild B.154
Übersicht zum Bruchverhalten der Zugprüfkörper vor und nach Alterung.

Klebstoffe:
A - Ottocoll S660
B - nolax C44.8505
C - Scotch-Weld DP 490

Holzart:
BFU Furniersperrholz Birke
VH Vollholz Kiefer

Prüfung vor Alterung:
-20 °C/+25 °C/+80 °C

Prüfung nach Alterung
UV1 Bestrahlung 500 h
UV2 Bestrahlung 1000 h
REI Reinigungsmittel-lagerung
FEU Befeuchtung bei +20 °C | 90 % rF
TRO Trocknung bei +20 °C | < 30 % rF
SO2 Lagerung in SO₂-haltiger Atmosphäre

A – Ottocoll S660 – Sperrholz

Kriechkurven bei +23 °C

Bild B.155

Direkte Messwerte vom Videoextensometer der Zeitstandanaloge.

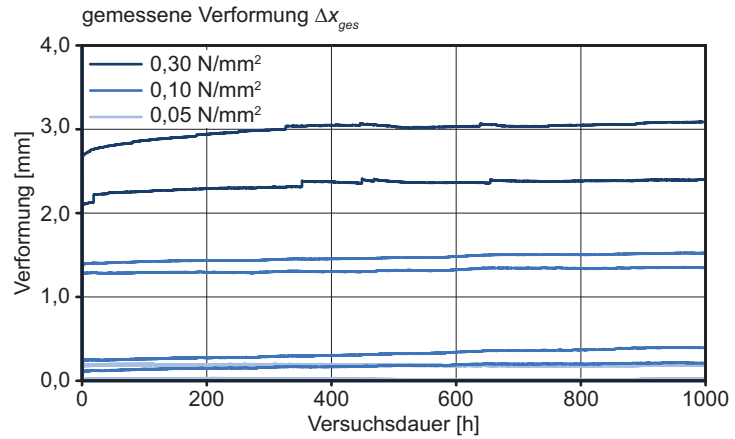


Bild B.156

Zeitabhängige Verformungen. Messwerte abzüglich der Anfangsverformung bei $t = 5$ s.

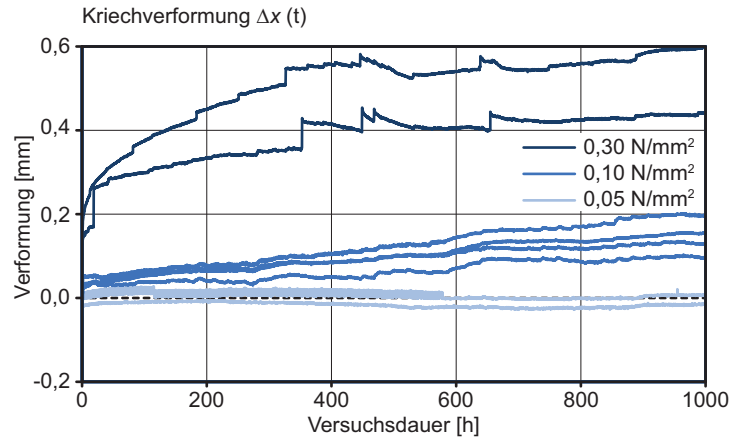
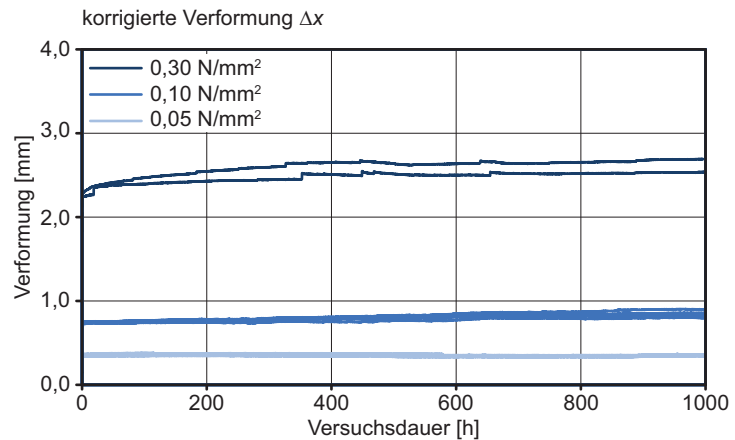


Bild B.157

Korrigierte Kriechkurven.



A – Ottocoll S660 – Sperrholz
Restfestigkeit nach Kriechversuch

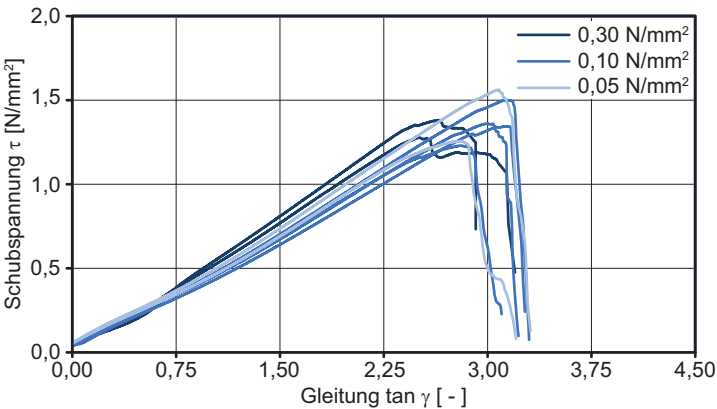


Bild B.158
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm. Die unterschiedlichen Vorbelastungsniveaus sind farbig gekennzeichnet.



Bild B.159
 Bruchbilder.

Flächenanteile: [%]
 Substratbruch Glas 0,0
 Adhäsion Glas 0,0
 Kohäsion Klebfuge 100,0
 Adhäsion Holz 0,0
 Substratbruch Holz 0,0

Tafel B.77

Prüfkörper ID	Lastniveau σ_{kr} [N/mm²]	Messwerte		Fugengeometrie		Spannung σ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
		Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Klebfäche A [mm²]	Dicke d [mm]		
C-A2-PW-01	0,10	801,6	9,2	600,0	3,0	1,34	3,05
C-A2-PW-02	0,10	815,8	9,0	600,0	3,0	1,36	3,00
C-A2-PW-03	0,10	736,9	8,4	600,0	3,0	1,23	2,80
C-A2-PW-04	0,10	898,5	9,4	600,0	3,0	1,50	3,13
C-A2-PW-05	0,05	936,7	9,2	600,0	3,0	1,56	3,08
C-A2-PW-06	0,05	753,4	8,4	600,0	3,0	1,26	2,82
C-A2-PW-07	0,30	828,1	8,0	600,0	3,0	1,38	2,65
C-A2-PW-08	0,30	765,5	7,5	600,0	3,0	1,28	2,51
Mittelwert X_{mean}		817,1	8,6	600,0	3,0	1,36	2,88

B – nolax C44.8505 – Sperrholz Kriechkurven bei +23 °C

Bild B.160

Direkte Messwerte vom Videoextensometer der Zeitstandanaloge.

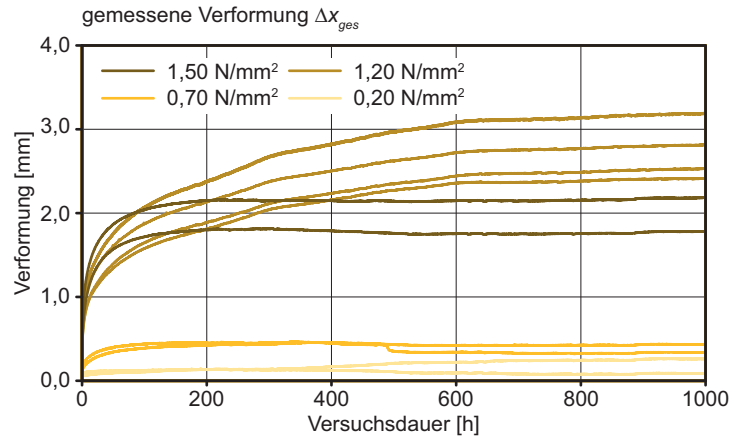


Bild B.161

Zeitabhängige Verformungen. Messwerte abzüglich der Anfangsverformung bei $t = 5$ s.

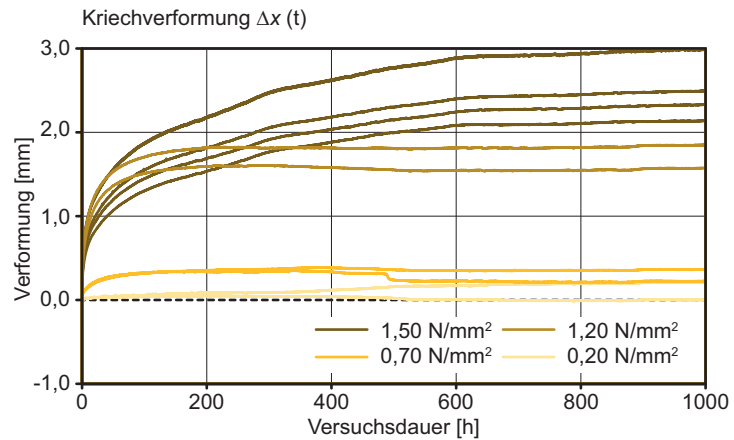
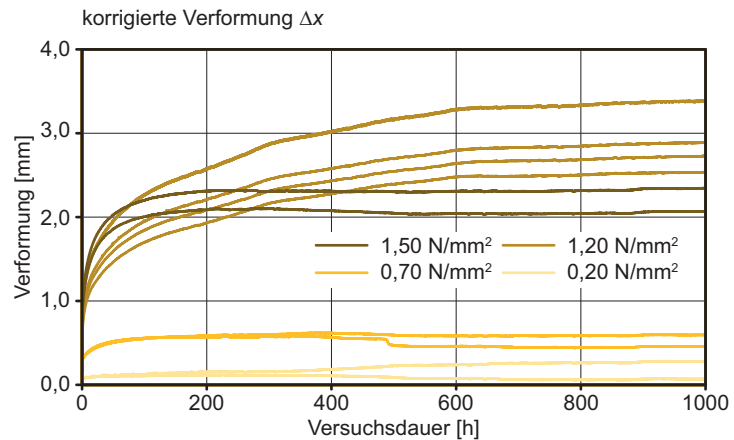


Bild B.162

Korrigierte Kriechkurven.



B – nolax C44.8505 – Sperrholz
Restfestigkeit nach Kriechversuch

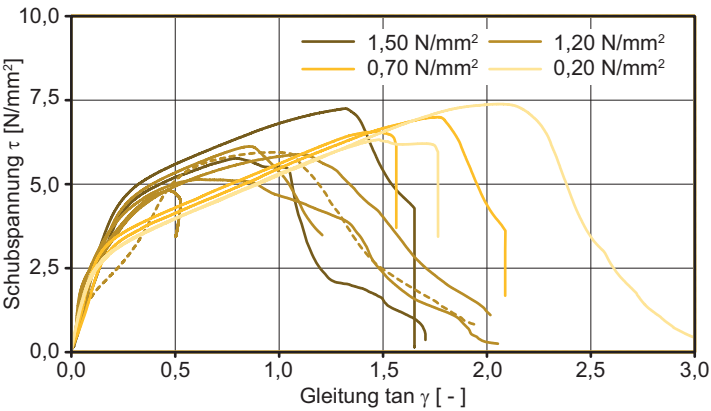


Bild B.163
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm. Die unterschiedlichen Vorbelastungsniveaus sind farbig gekennzeichnet.
 Prüfkörper C-B2-PW-02 aus den Spannbacken gerutscht. Die Wiederholungsprüfung ist gestrichelt dargestellt.

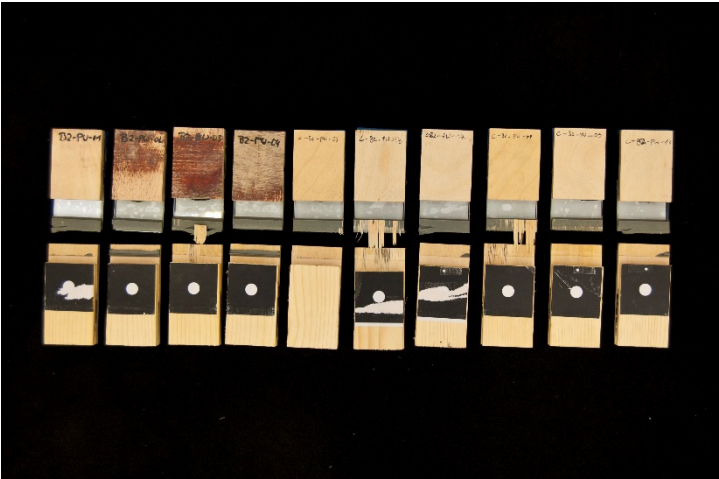


Bild B.164
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	0,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	9,5
Adhäsion Holz	74,5
Substratbruch Holz	16,0

Tafel B.78

Prüfkörper ID	Lastniveau τ_{kr} [N/mm²]	Messwerte		Fugengeometrie		Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
		Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Klebfäche A [mm²]	Dicke d [mm]		
C-B2-PW-01	1,20	3669,8	2,6	600,0	3,0	6,12	0,86
C-B2-PW-02	1,20	3566,3	3,0	600,0	3,0	5,94	0,98
C-B2-PW-03	1,20	3081,7	1,9	600,0	3,0	5,14	0,62
C-B2-PW-04	1,20	3527,7	3,3	600,0	3,0	5,88	1,11
C-B2-PW-05	0,70	4195,2	5,3	600,0	3,0	6,99	1,77
C-B2-PW-06	0,70	3934,9	4,4	600,0	3,0	6,56	1,47
C-B2-PW-07	0,20	4429,5	6,2	600,0	3,0	7,38	2,06
C-B2-PW-08	0,20	3794,0	4,4	600,0	3,0	6,32	1,48
C-B2-PW-09	1,50	3459,5	2,4	600,0	3,0	5,77	0,79
C-B2-PW-10	1,50	4348,9	2,4	600,0	3,0	7,25	0,79
Mittelwert X_{mean}		3800,8	3,6	600,0	3,0	6,33	1,19

C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz

Kriechkurven bei +23 °C

Bild B.165

Direkte Messwerte vom Videoextensometer der Zeitstandanlage.

Glasbruch bei einem Prüfkörper.

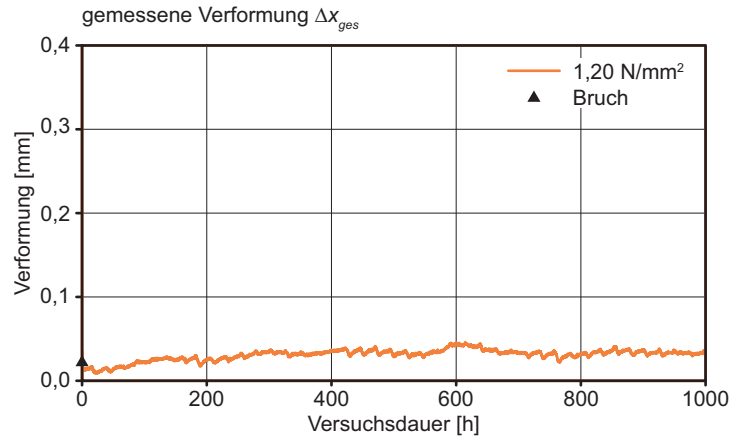


Bild B.166

Zeitabhängige Verformungen. Messwerte abzüglich der Anfangsverformung bei $t = 5$ s.

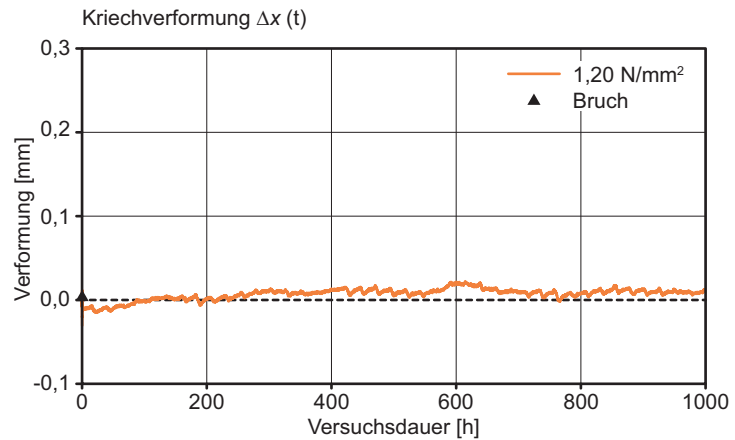
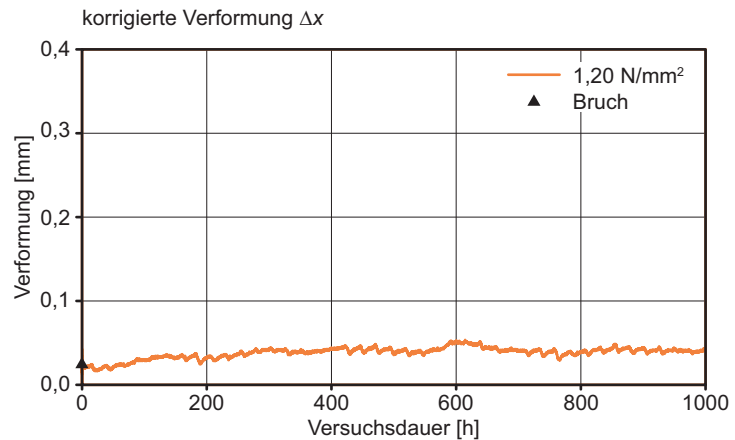


Bild B.167

Korrigierte Kriechkurven.



C – Scotch-Weld DP 490 – Sperrholz
Restfestigkeit nach Kriechversuch

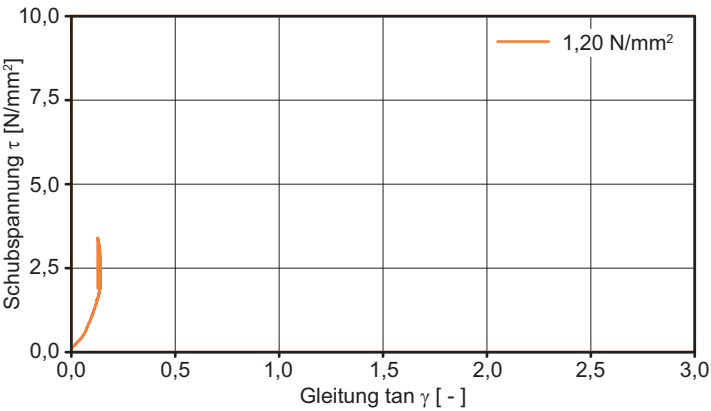


Bild B.168
 Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm. Die unterschiedlichen Vorbelastungsniveaus sind farbig gekennzeichnet.

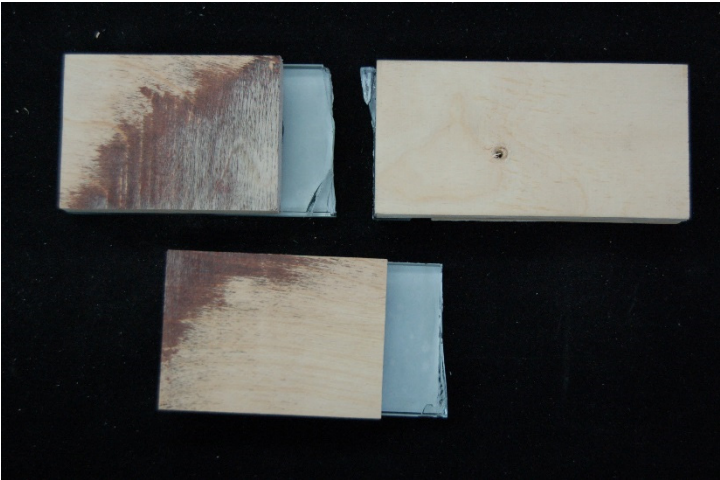


Bild B.169
 Bruchbilder.

Flächenanteile:	[%]
Substratbruch Glas	100,0
Adhäsion Glas	0,0
Kohäsion Klebfuge	0,0
Adhäsion Holz	0,0
Substratbruch Holz	0,0

Tafel B.79

Prüfkörper ID	Lastniveau τ_{kr} [N/mm²]	Messwerte		Fugengeometrie		Spannung τ_{max} [N/mm²]	Gleitung $\tan \gamma$ [-]
		Kraft F_{max} [kN]	Verformung Δx [mm]	Klebfläche A [mm²]	Dicke d [mm]		
C-C3-PW-01	1,20	2034,7	0,03	600,0	3,0	3,39	0,01
C-C3-PW-02	1,20	-	-	600,0	3,0	-	-
Mittelwert X_{mean}		2034,7	0,03	600,0	3,0	3,39	0,01

Anhang C – Bauteilähnliche Prüfkörper

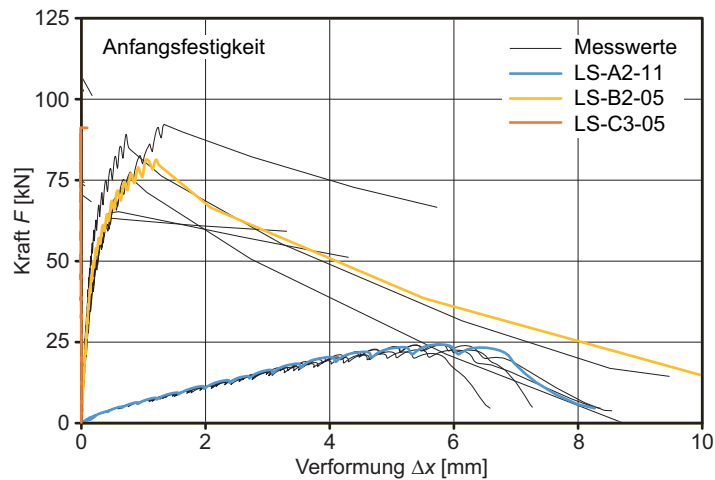
Schubtragfähigkeit in Längsrichtung (Kurzzeitbelastung)

Anfangsfestigkeit	374
nach Lastniveau 1 (5 % $R_{u,5}$)	375
nach Lastniveau 2 (10 % $R_{u,5}$)	376
nach Lastniveau 3 (35 % $R_{u,5}$)	377
nach Lastniveau 4 (55 % $R_{u,5}$)	378
nach Lastniveau 5 (70 % $R_{u,5}$)	379

Bauteilversuche – Anfangsfestigkeit

Bild C.1

Kraft-Verformungsbeziehung mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers je Klebstoff.



Tafel C.1

Einzelergebnisse für
A – Ottocoll S660.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:

Standardabw. σ_X 0,05

Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$ 2,46

5 %-Quantil $R_{u,5}$ 0,86

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-A2-09	21,8	5,2	0,91	1,73	1,08
LS-A2-10	22,5	5,5	0,94	1,82	1,23
LS-A2-11	24,1	5,8	1,01	1,93	1,23
LS-A2-12	24,3	5,8	1,01	1,93	1,16
LS-A2-13	23,9	5,8	1,00	1,93	1,09
Mittelwert X_{mean}	23,3	5,6	0,97	1,87	1,16

Tafel C.2

Einzelergebnisse für
B – nolax C44.8505.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:

Standardabw. σ_X 0,49

Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$ 2,33

5 %-Quantil $R_{u,5}$ 2,12

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-B2-05	81,4	1,0	3,39	0,35	33,48
LS-B2-06	89,1	0,7	3,71	0,24	40,19
LS-B2-07	76,1	0,8	3,17	0,26	25,96
LS-B2-08	65,2	0,6	2,72	0,20	27,12
LS-B2-09	92,2	1,3	3,84	0,44	31,32
LS-B2-10	64,7	0,4	2,70	0,15	30,27
Mittelwert X_{mean}	78,1	0,8	3,25	0,27	31,39

Tafel C.3

Einzelergebnisse für
C – Scotch-Weld DP 490.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:

Standardabw. σ_X 0,77

Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$ 2,33

5 %-Quantil $R_{u,5}$ 2,12

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G ^a [N/mm ²]
LS-C3-01	74,3	-0,02	3,10	-0,01	k. A.
LS-C3-02	104,0	0,00	4,33	0,00	k. A.
LS-C3-03	73,0	0,02	3,04	0,01	k. A.
LS-C3-04	107,3	0,01	4,47	0,00	k. A.
LS-C3-05	91,2	-0,01	3,80	0,00	k. A.
LS-C3-06	74,9	0,00	3,12	0,00	k. A.
Mittelwert X_{mean}	87,4	-0,01	3,64	0,00	k. A.

^a Schubmodul aufgrund der geringen Verformungen nicht bestimmbar.

Bauteilversuche – nach Lastniveau 1 (5 % $R_{u,5}$)

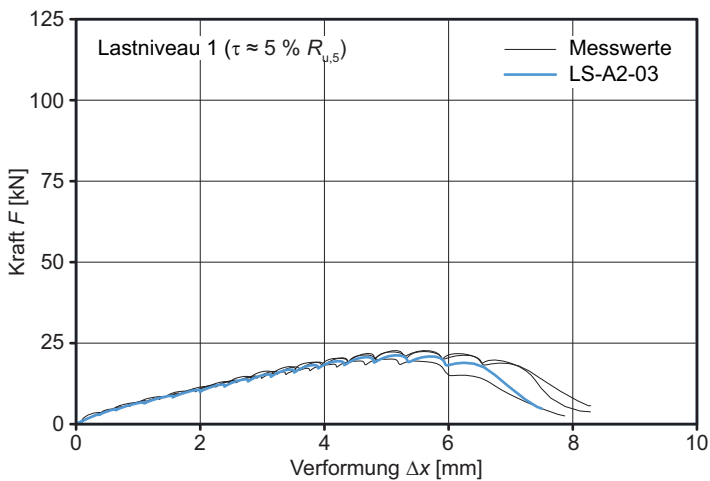


Bild C.2
Kraft-Verformungsbeziehung mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers je Klebstoff.

Vorbelastung durch eine Dauerschubspannung von:
A – S660 0,05 N/mm²
B – C44.8505
C – DP 490

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-A2-01	22,5	5,2	0,94	1,72	1,07
LS-A2-03	21,1	5,1	0,88	1,71	1,06
LS-A2-04	22,2	5,6	0,93	1,87	1,51
LS-A2-08	19,9	5,1	0,83	1,69	1,06
Mittelwert X_{mean}	21,4	5,2	0,89	1,75	1,18

Tafel C.4
Einzelergebnisse für A – Ottocoll S660.

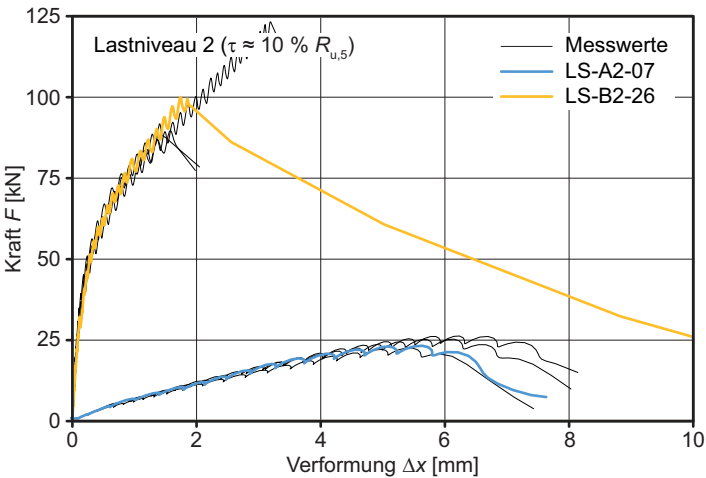
Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:
Standardabw. σ_x 0,05
Exzentrizität $\tau_{a\beta}$ 2,68
5 %-Quantil $R_{u,5}$ 0,76

Bauteilversuche – nach Lastniveau 2 (10 % $R_{u,5}$)

Bild C.3

Kraft-Verformungsbeziehung mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers je Klebstoff.

Vorbelastung durch eine Dauerschubspannung von:
A – S660 0,10 N/mm²
B – C44.8505 0,20 N/mm²
C – DP 490



Tafel C.5

Einzelergebnisse für
A – Ottocoll S660.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:

Standardabw. σ_X 1,01

Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$ 2,68

5 %-Quantil $R_{u,5}$ 0,81

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-A2-07	23,1	5,6	0,96	1,88	0,89
LS-A2-17	22,4	5,5	0,93	1,83	0,89
LS-A2-18	25,1	6,2	1,05	2,05	0,95
LS-A2-19	26,1	6,2	1,09	2,08	0,69
Mittelwert X_{mean}	24,2	5,9	1,01	1,96	0,85

Tafel C.6

Einzelergebnisse für
B – nolax C44.8505.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:

Standardabw. σ_X 0,64

Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$ 2,68

5 %-Quantil $R_{u,5}$ 2,49

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-B2-22	91,7	1,4	3,82	0,47	30,99
LS-B2-24	123,3	3,2	5,14	1,06	28,95
LS-B2-25	89,7	1,6	3,74	0,53	27,34
LS-B2-26	100,0	1,7	4,17	0,58	22,42
Mittelwert X_{mean}	101,2	2,0	4,22	0,66	27,43

Bauteilversuche – nach Lastniveau 3 (35 % $R_{u,5}$)

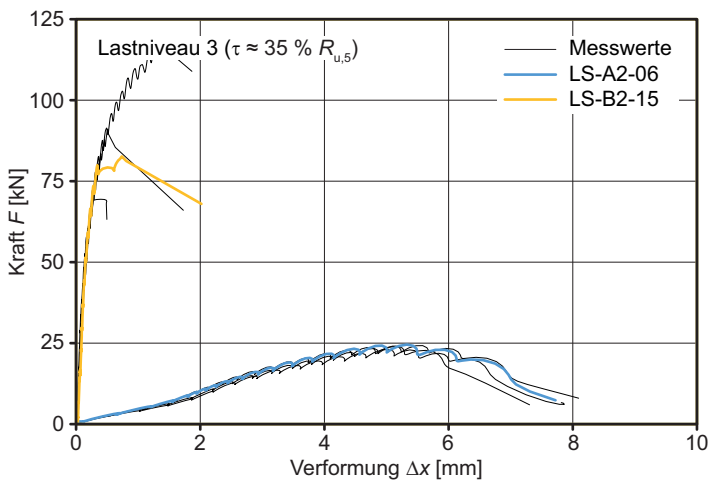


Bild C.4
Kraft-Verformungsbeziehung mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers je Klebstoff.

Vorbelastung durch eine Dauerschubspannung von:
A – S660 0,30 N/mm²
B – C44.8505 0,70 N/mm²
C – DP 490

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-A2-05	24,4	5,3	1,02	1,78	0,38
LS-A2-06	23,9	5,1	1,00	1,70	0,35
LS-A2-15	22,9	5,0	0,95	1,68	0,65
LS-A2-16	24,1	5,6	1,00	1,86	0,68
Mittelwert X_{mean}	23,8	5,3	0,99	1,76	0,51

Tafel C.7
Einzelergebnisse für
A – Ottocoll S660.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:
Standardabw. σ_X 1,00
Exzentrizität $\tau_{a\beta}$ 2,68
5 %-Quantil $R_{u,5}$ 0,92

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-B2-15	91,0	0,5	3,79	0,17	39,19
LS-B2-16	69,3	0,4	2,89	0,13	42,07
LS-B2-21 (9500 h)	117,0	1,4	4,87	0,46	45,48
LS-B2-18 (9500 h)	82,6	0,7	3,44	0,25	52,59
Mittelwert X_{mean}	90,0	0,8	3,75	0,25	44,83

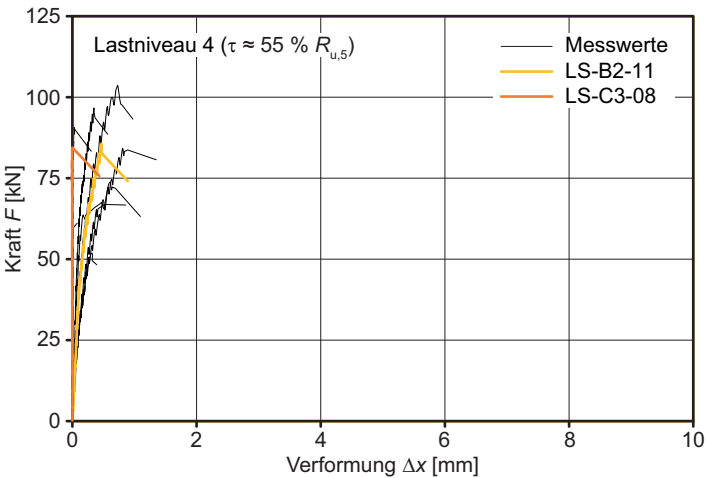
Tafel C.8
Einzelergebnisse für
B – nolax C44.8505.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:
Standardabw. σ_X 0,84
Exzentrizität $\tau_{a\beta}$ 2,68
5 %-Quantil $R_{u,5}$ 1,51

Bauteilversuche – nach Lastniveau 4 (55 % $R_{u,5}$)

Bild C.5
Kraft-Verformungsbeziehung mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers je Klebstoff.

Vorbelastung durch eine Dauerschubspannung von:
A – S660
B – C44.8505 1,20 N/mm²
C – DP 490 1,20 N/mm²



Tafel C.9
Einzelergebnisse für
B – nolax C44.8505.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:
Standardabw. σ_X 0,57
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$ 2,33
5 %-Quantil $R_{u,5}$ 2,21

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-B2-11	85,6	0,5	3,57	0,16	38,13
LS-B2-12	96,6	0,3	4,03	0,12	55,25
LS-B2-14	73,7	0,6	3,07	0,20	45,39
LS-B2-13	103,6	0,7	4,32	0,24	38,69
LS-B2-29 (7000 h)	84,1	0,8	3,51	0,27	25,90
LS-B2-23 (7000 h)	66,8	0,5	2,78	0,17	31,49
Mittelwert X_{mean}	85,1	0,6	3,54	0,19	39,14

Tafel C.10
Einzelergebnisse für
C – Scotch-Weld DP 490.

Charakteristische Schubfestigkeit in N/mm²:
Standardabw. σ_X 0,77
Exzentrizität $\tau_{\alpha\beta}$ 2,68
5 %-Quantil $R_{u,5}$ 0,93

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G^a [N/mm ²]
LS-C3-07	90,7	0,02	3,78	0,01	295,09
LS-C3-08	84,3	0,00	3,51	0,00	k. A.
LS-C3-09	51,8	0,32	2,16	0,11	46,34
LS-C3-10	61,2	0,08	2,55	0,03	k. A.
Mittelwert X_{mean}	72,0	0,10	3,00	0,03	170,72

^a Schubmodul aufgrund der geringen Verformungen z. T. nicht bestimmbar.

Bauteilversuche – nach Lastniveau 5 (70 % $R_{u,5}$)

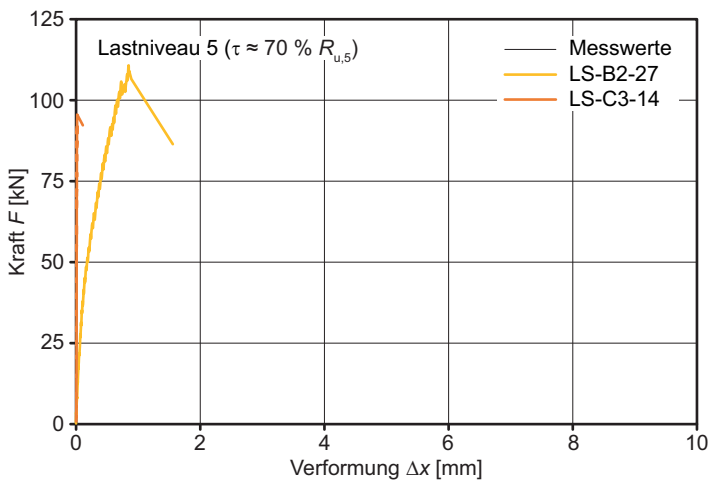


Bild C.6
Kraft-Verformungsbeziehung mit Markierung eines repräsentativen Prüfkörpers je Klebstoff.

Vorbelastung durch eine Dauerschubspannung von:
A – S660
B – C44.8505 1,50 N/mm²
C – DP 490 1,50 N/mm²

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-B2-27	85,6	0,5	3,57	0,34	37,82
LS-B2-28	110,7	1,0	4,61	0,17	30,02
LS-B2-19 (8280 h)	Probe beim Kriechversuch gebrochen				
LS-B2-17 (8280 h)	Probe beim Kriechversuch gebrochen				
Mittelwert X_{mean}	98,2	0,8	4,09	0,25	33,92

Tafel C.11
Einzelergebnisse für
B – nolax C44.8505.

PK ID	F_{\max} [kN]	Δx_m [mm]	τ_{\max} [N/mm ²]	$\tan \gamma$ [-]	G [N/mm ²]
LS-C3-12	67,0	0,0	2,79	0,01	490,32
LS-C3-14	95,5	0,1	3,98	0,01	111,87
Mittelwert X_{mean}	81,3	0,0	3,39	0,01	301,10

Tafel C.12
Einzelergebnisse für
C – Scotch-Weld DP 490.

